

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Consumo de energía eléctrica en el sector industrial:
Metales, siderurgia y gases industriales

AUTOR: D. Carlos Javier Martínez de la Cruz

TUTOR: D. Fernando Soto Martos

Leganés, enero de 2011

PROYECTO FIN DE CARRERA

Título: *Consumo de energía eléctrica en el sector industrial: Metales, siderurgia y gases industriales*

Autor: D. Carlos Javier Martínez de la Cruz

Tutor: D. Fernando Soto Martos

Índice de contenidos

Capítulo 1.	Introducción.....	Pág. 1
1.1.	Estructura de la memoria.....	Pág. 1
1.2.	Fases de desarrollo.....	Pág. 2
1.3.	Medios empleados.....	Pág. 2
Capítulo 2.	Objetivos.....	Pág. 3
Capítulo 3.	El Sistema Eléctrico y su Demanda.....	Pág. 4
3.1.	Generación, transporte y distribución de la electricidad.....	Pág. 4
3.1.1.	Generación de la energía eléctrica.....	Pág. 4
3.1.2.	Transporte de la energía eléctrica.....	Pág. 5
3.1.3.	Distribución de la Energía Eléctrica.....	Pág. 9
3.2.	La demanda de energía eléctrica.....	Pág. 11
Capítulo 4.	Las Industrias y sus patrones de consumo eléctrico.....	Pág. 15
4.1.	Industria siderúrgica.....	Pág. 16
4.1.1.	Proceso integral de producción de acero.....	Pág. 17
4.1.2.	Proceso no integral de producción de acero.....	Pág. 21
4.1.3.	Colada continua de Planchones.....	Pág. 22
4.1.4.	Colada continua de palanquillas.....	Pág. 23
4.1.5.	Laminación de productos terminados.....	Pág. 23
4.1.6.	Consumo de Energía en Siderurgia.....	Pág. 24
4.2.	La industria de la extracción de zinc.....	Pág. 26
4.2.1.	Obtención del zinc.....	Pág. 29
4.2.2.	Proceso de Obtención electrolítica de zinc.....	Pág. 30
4.2.3.	Consumo de energía eléctrica en la producción de zinc.....	Pág. 34
4.3.	La industria de la extracción de gases industriales.....	Pág. 36

4.3.1. Proceso de fraccionamiento del aire.....	Pág. 40
4.3.2. Fases en la planta de fraccionamiento de aire.....	Pág. 41
4.3.3. Consumo de Energía en el fraccionamiento de aire.....	Pág. 43
Capítulo 5. Herramienta informática de simulación.....	Pág. 46
5.1. Estructura de la herramienta.....	Pág. 46
5.2. Simulación de casos.....	Pág. 50
Capítulo 6. Conclusiones.....	Pág. 58
Bibliografía	Pág. 59

Índice de figuras

Figura 1. Centro de control eléctrico CECOEL de Red Eléctrica de España.....	Pág. 4
Figura 2. Diagrama de flujo de la generación transporte y distribución de la electricidad.....	Pág. 5
Figura 3. Potencia de generación eléctrica instalada en España.....	Pág. 6
Figura 4. Valores de Potencia instalada por tecnologías en 2010.....	Pág. 6
Figura 5. Líneas aéreas eléctricas de transporte en A.T.....	Pág. 7
Figura 6. Demanda de energía eléctrica del 20-01-2010.....	Pág. 11
Figura 7. Consumo de energía mensual entre 2005 y 2009.....	Pág. 12
Figura 8. Máxima demanda de potencia media horaria y de energía diaria.....	Pág. 12
Figura 9. Demanda de energía eléctrica del 18-12-2007.....	Pág. 13
Figura 10. Crecimiento anual de la demanda.....	Pág. 13
Figura 11. Consumo de energía eléctrica final en el sector Industrial (GWh).....	Pág. 15
Figura 12. Esquema de funcionamiento de planta integral, producción de arrabio.....	Pág. 17
Figura 13. Esquema de funcionamiento de planta integral, convertidor de acero..	Pág. 17
Figura 14. Esquema de colada continua de planchones y palanquillas.....	Pág. 18

Figura15. Batería de hornos de coque.....	Pág. 19
Figura 16. Esquema de funcionamiento de un alto horno.....	Pág. 20
Figura17. Esquema de un horno eléctrico de arco indirecto.....	Pág. 22
Figura 18. Colada continua de planchones.....	Pág. 23
Figura 19. Patrón de consumo eléctrico entre diario en planta siderúrgica.....	Pág. 25
Figura 20. Patrón de consumo eléctrico en domingo en planta siderúrgica.....	Pág. 25
Figura 21. Patrón de consumo semanal de industria siderúrgica.....	Pág. 26
Figura 22. Uso como materia prima y uso en industria de zinc en 2003.....	Pág. 27
Figura 23. Producción y demanda mundial anual de zinc durante el periodo 1962-2010.	Pág. 28
Figura 24. Producción mundial de zinc por continentes (miles de tm/año) durante el periodo de 2003-2009.....	Pág. 28
Figura 25. Diagrama de flujo simplificado del proceso electrolítico de producción de zinc.....	Pág. 30
Figura 26. Esquema de funcionamiento de planta de producción de zinc.....	Pág. 31
Figura 27. Paquetes de zinc de 1000 Kg. Calidad 99.995%.....	Pág. 34
Figura 28. Patrón de consumo eléctrico diario de planta de zinc.....	Pág. 35
Figura 29. Patrón de consumo eléctrico semanal de planta de zinc.....	Pág. 35
Figura 30. Planta de fraccionamiento de aire de Messer en el Morell.....	Pág. 36
Figura 31. Esquema de un convertidor de acero con inyectado de Oxígeno.....	Pág. 37
Figura 32. Faro de gas xenón en automóvil.....	Pág. 40
Figura 33. Diagrama de flujo de fraccionamiento del aire.....	Pág. 41
Figura 34. Planta fraccionamiento de aire de Messer en Hungría.....	Pág. 43
Figura 35. Patrón de consumo eléctrico diario de industria de fraccionamiento de aire.....	Pág. 44
Figura 36. Patrón de consumo eléctrico en Domingo de industria de fraccionamiento de aire.....	Pág. 44

Figura 37. Patrón de consumo eléctrico semanal de industria de fraccionamiento de aire.....	Pág. 45
Figura 38. Porcentaje de consumo eléctrico por procesos en el fraccionamiento del aire.....	Pág. 45
Figura 39. Hoja de introducción de datos de la aplicación de simulación.....	Pág. 46
Figura 40. Hoja de cálculo de valores de la aplicación de simulación.....	Pág. 47
Figura 41. Hoja de serie de datos resultados de la aplicación de simulación.....	Pág. 48
Figura 42. Ejemplo de Demanda agregada y energía consumida en miércoles y jueves del ejemplo propuesto.....	Pág. 49
Figura 43. Consumo eléctrico en miércoles del sector siderúrgico.....	Pág. 50
Figura 44. Consumo eléctrico en sábado del sector siderúrgico.....	Pág. 51
Figura 45. Consumo eléctrico semanal del sector siderúrgico.....	Pág. 51
Figura 46. Consumo eléctrico en miércoles del sector de metalurgia no férrea.....	Pág. 52
Figura 47. Consumo eléctrico en miércoles del sector de metalurgia no férrea.....	Pág. 52
Figura 48. Consumo eléctrico semanal del sector de metalurgia no férrea.....	Pág. 53
Figura 49. Consumo eléctrico en miércoles en el sector de extracción de gases.....	Pág. 54
Figura 50. Consumo eléctrico en sábado en el sector de la extracción de gases.....	Pág. 54
Figura 51. Consumo eléctrico semanal en el sector de la extracción de gases.....	Pág. 55
Figura 52. Demanda agregada en miércoles.....	Pág. 56
Figura 53. Demanda agregada en Domingo.....	Pág. 56
Figura 54. Demanda semanal agregada de los 3 sectores.....	Pág. 57

Índice de tablas

Tabla 1. Evolución de la red de Transporte, posiciones de subestaciones y capacidad de transformación de la red eléctrica.....	Pág. 8
Tabla 2. TIEPI en España (2008).....	Pág. 10
Tabla 3. Producción de acero total en España en 2006, 2007, 2008.....	Pág. 16
Tabla 4. Producciones siderúrgicas en España en 2007 y 2008.....	Pág. 16
Tabla 5. Propiedades físicas del zinc.....	Pág. 29
Tabla 6. Minerales para obtención de zinc.....	Pág. 29
Tabla 7. Principales propiedades físicas del Oxígeno.....	Pág. 38
Tabla 8. Principales propiedades del Nitrógeno.....	Pág. 39
Tabla 9. Principales propiedades del Argón.....	Pág. 39



Capítulo 1

Introducción

Hablar de Industria, significa hablar de consumo de energía eléctrica. Gracias a la electricidad ha sido posible el crecimiento y desarrollo de las tecnologías hasta nuestro tiempo. Sin ella, no sería posible casi ningún tipo de proceso industrial.

El control de la electricidad permite poder usar tecnologías como el alumbrado eléctrico, movimiento de motores, el uso de la electrolisis para procesos metalúrgicos o la utilización de hornos eléctricos para alcanzar grandes temperaturas a las que sería imposible llegar usando métodos tradicionales.

En este PFC se analiza el consumo industrial de electricidad en nuestro país, en los sectores de Siderurgia, Metales y Gases industriales, que forman una parte de la demanda eléctrica de España y que también será analizada con detalle.

De los procesos de siderurgia, se estudian la producción integral y la no integral, para la metalurgia no férrea, el PFC se centra en a producción de zinc, y en el sector de gases industriales, se estudia el proceso de fraccionamiento del aire, que permite la obtención de Nitrógeno, Oxígeno, Argón y otros gases nobles.

El motivo de este análisis es la necesidad de controlar y gestionar el consumo eléctrico de las industrias citadas, pues supone un coste económico que si se realiza de una forma inteligente se puede llegar a reducir minimizándolo, incrementándose el beneficio para las empresas electro-intensivas, que consumen energía eléctrica de manera masiva.

3.2. Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- El Sistema Eléctrico y su Demanda

Aquí se analiza la estructura del Sistema Eléctrico en España, su generación, transporte y distribución de electricidad. Se estudia la curva de Demanda de electricidad en distintos ámbitos temporales, sus valores máximos y mínimos, sus horas punta y valle y los factores de los que depende.

- Las Industrias y sus patrones de consumo eléctrico

Este apartado trata del consumo industrial de energía en España, en especial de la energía eléctrica, de la que se presentan datos de consumo. A continuación se describen los procesos industriales de siderurgia (integral y no integral), de producción de zinc y de extracción de gases industriales por fraccionamiento del aire. Se identifican los procesos en los que se consume mucha energía, se particulariza en la energía eléctrica y se muestran los patrones de consumo eléctrico de los 3 sectores.



- Herramienta informática de simulación

En esta parte del proyecto se explica el tipo de aplicación informática que se ha desarrollado, su estructura, funciones, y el proceso de desarrollo de la herramienta. A continuación se procede a una simulación de un caso particular de varias industrias.

- Conclusiones

Se analiza el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos, tanto desde el punto de vista técnico de los temas seleccionados, como desde la elaboración del PFC en su conjunto. Se identifican aquellos aspectos del desarrollo personal que se han alcanzado con la elaboración del trabajo.

- Bibliografía

Citas de toda la bibliografía utilizada para la elaboración del PFC.

1.2. Fases del desarrollo

Para desarrollar este PFC, ha sido necesario pasar por una serie de fases que se explican a continuación:

La primera fue la búsqueda y selección de información, a través de bibliografía e internet de los procesos industriales de siderurgia, metalurgia del zinc y extracción de gases industriales, investigar sus procesos de producción y sus patrones de consumo de energía, puntualizando en el consumo de energía eléctrica. Además también ha sido necesaria la consulta de estadísticas del INE (Instituto Nacional de Estadística), de la página web de Red Eléctrica de España, e incluso de apuntes de asignaturas impartidas en la carrera de Ingeniería Industrial.

Una vez analizada y desarrollada la primera parte de la memoria, se procedió al desarrollo de la herramienta informática de simulación en Excel, para lo que fue necesario hacer uso de conocimientos de programación adquiridos durante la formación universitaria y durante la misma realización del PFC.

Para finalizar, y con objeto de ilustrar los resultados de la aplicación informática, se ha realizado una simulación de un caso en el que existen varias plantas siderúrgicas, metalúrgicas y de extracción de gases funcionando, en las que se ha calculado su consumo de energía eléctrica y dibujado sus curvas de demanda de electricidad diaria y semanal, que han sido analizadas.

1.3. Medios empleados

Para la realización de este PFC, se ha utilizado un PC con las herramientas de Microsoft Office Word y Excel. Como fuente de información principal se han usado Internet y toda la bibliografía descrita al final del documento en el apartado de Bibliografía. También se han mantenido varias reuniones tutor-alumno durante todo el desarrollo, donde el tutor ha ido proponiendo hitos a conseguir, ha facilitado información de las industrias, de sus patrones de consumo de electricidad y se ha encargado de revisar la redacción y presentación final del PFC.



Capítulo 2

Objetivos

El principal objetivo del PFC reside en analizar los procesos de producción industrial de la siderurgia, la metalurgia del zinc y los gases industriales, con especial énfasis en lo relacionado con su consumo de energía eléctrica, para la elaboración de patrones de consumo energético.

Como objetivo secundario, se diseñará una aplicación informática que permita simular este tipo de consumos industriales.

Capítulo 3

El Sistema Eléctrico y su Demanda

La Energía Eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades. Por eso, en todo momento su producción debe igualarse a su consumo de forma precisa e instantánea, lo que requiere un equilibrio constante del sistema.

El operador que se encarga de este equilibrio en España es Red Eléctrica, para ello, prevé el consumo, opera y supervisa las instalaciones de generación y transporte para que la producción programada en las centrales coincida en todo momento con la demanda real de los consumidores.

El operador envía las órdenes oportunas a las centrales para que ajusten sus producciones de energía.



Figura 1: Centro de control eléctrico CECOEL de Red Eléctrica de España

Fuente: [1]

3.1. Generación, transporte y distribución de la electricidad

Para una óptima utilización de los recursos energéticos y garantizar el acceso a la red eléctrica a todos los usuarios, es preciso distinguir en el sistema eléctrico las etapas de generación, transporte y distribución de la electricidad.

3.1.1. Generación de la energía eléctrica

La energía eléctrica se genera en las centrales eléctricas uniformemente distribuidas por toda España.

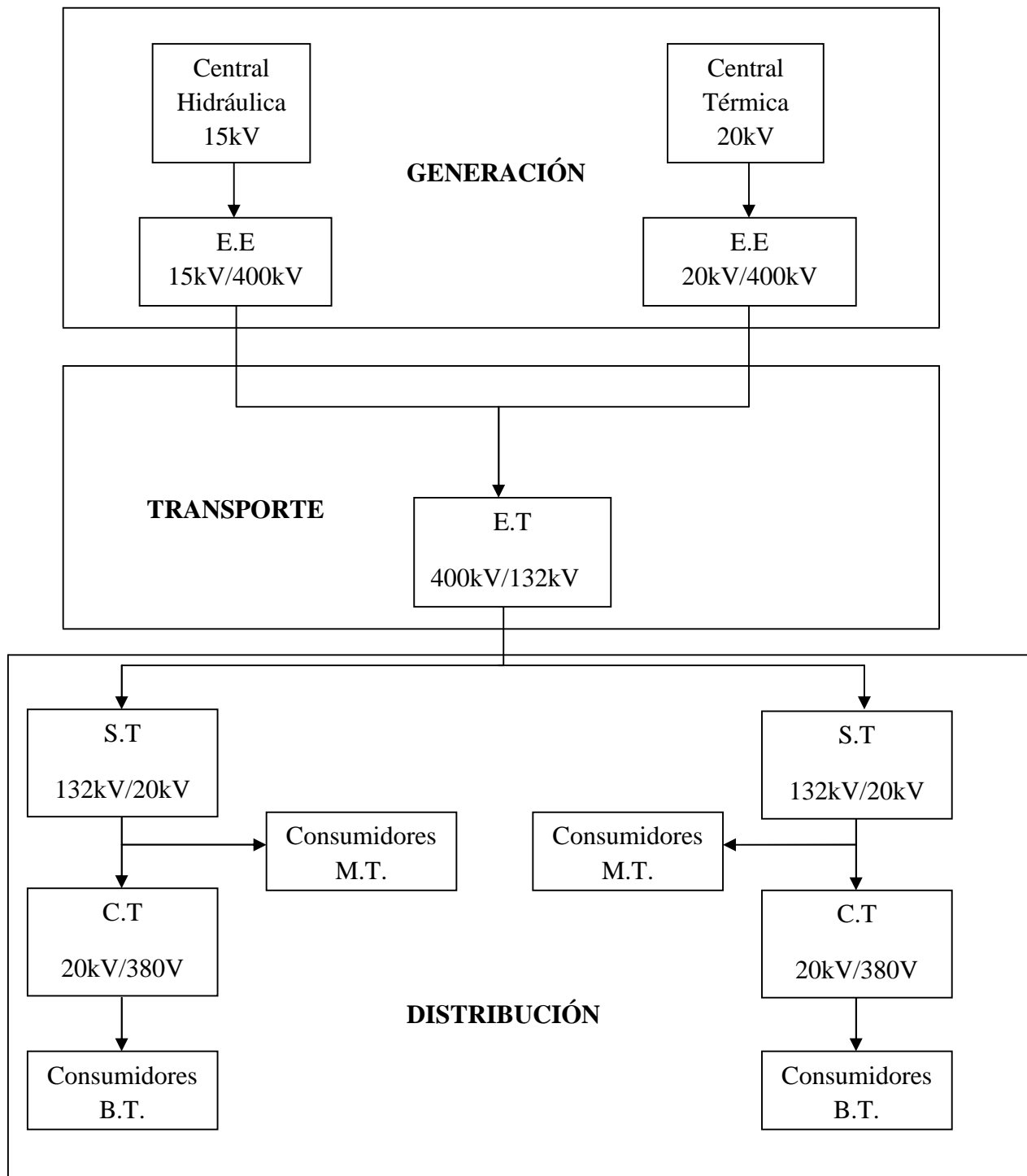


Figura 2: Diagrama de flujo de la generación transporte y distribución de la electricidad

Las principales centrales de electricidad existentes en España según tecnologías son: nucleares, fuel/gas, eólicas, hidráulicas, carbón y ciclo combinado. Existe también un grupo de energías especiales, renovables y cogeneración, como son la fotovoltaica, geotérmica, etc. que aunque son caras y poco eficientes, también son muy importantes para el sistema.

La potencia total instalada en España ha ido aumentando con el tiempo como se puede ver en la siguiente gráfica que comprende el periodo desde 1940 hasta 1996.

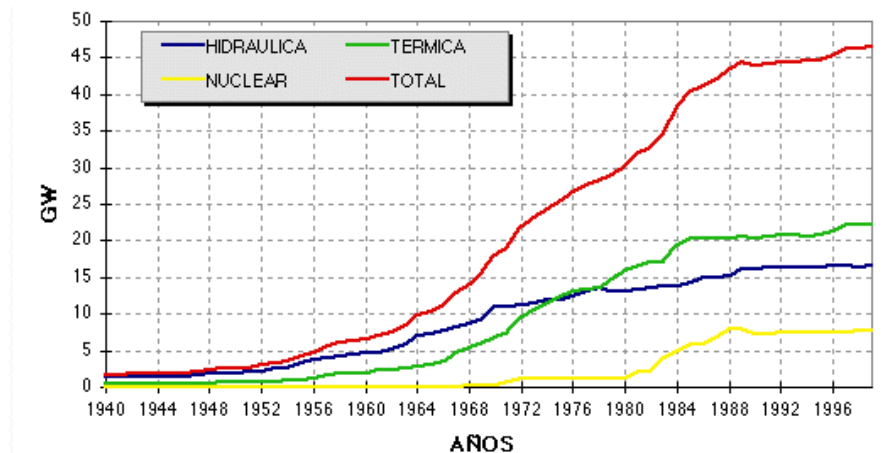


Figura 3: Potencia de generación eléctrica instalada en España

Fuente: [1]

Se observa un crecimiento muy pequeño de la energía nuclear, con un desarrollo lento entre 1968 y 1980, y más rápido entre 1980 y 1988 donde se estanca. También se observa como la energía térmica clásica crece más rápido que la nuclear y la hidráulica, superándolas en potencia instalada en la actualidad.

A 31-12-2010 los valores de potencia instalada según tecnologías es la siguiente:

Hidráulica	16.657 MW	17%
Nuclear	7.716 MW	8%
Carbón	11.380 MW	12%
Fuel/Gas	2.860 MW	3%
Ciclo combinado	25.220 MW	26%
Eólica	19.813 MW	20%
Solar	4.018 MW	4%
Cogeneración y otras renovables	9.783 MW	10%
Total	97.447 MW	100%

Figura 4: Valores de Potencia instalada por tecnologías en 2010

Fuente: [1]

Tras la generación de la electricidad, que suele ser en torno a 10-20kV, ésta se transforma a Alta Tensión (400-220kV) para ser transportada por la red con las mínimas pérdidas posibles.

3.1.2. Transporte de la energía eléctrica

Tiene por objeto el tránsito de la energía eléctrica por la red interconectada, con el fin de suministrarla a los consumidores finales, a clientes y atender a los intercambios internacionales.

El transporte y distribución de energía eléctrica se realiza por medio de líneas aéreas y cables subterráneos.

Las líneas aéreas se usan para el tránsito de grandes potencias a largas distancias (transporte) y para el abastecimiento eléctrico a áreas rurales o de población dispersa. Los cables soterrados, por su parte, se usan principalmente para la distribución de energía eléctrica en zonas urbanas e industriales con alta densidad de población.

El transporte de la electricidad es realizado por Red Eléctrica de España (REE). Para ello, diseña, construye, mantiene y opera las infraestructuras eléctricas que componen la red de transporte y que conectan las centrales de generación con los puntos de distribución a los consumidores.

REE actúa como transportista único. Es propietaria del 99% de la red de transporte y, por tanto, es la empresa especializada en la actividad de transporte de energía eléctrica en España. El 1% restante, actualmente en propiedad de las empresas eléctricas, deberá ser adquirido por Red Eléctrica, según establece la Ley 17/2007 en un plazo máximo de tres años desde su aprobación.



Figura 5: Líneas aéreas eléctricas de transporte en A.T.

Fuente: [1]

Según datos de 2009, la red de transporte está compuesta por 17.977 kilómetros de líneas eléctricas de 400kV, 16.777 Kilómetros de líneas de 220kV o menor, 3.385

posiciones de subestaciones, y cuenta con 66.259 MVA de capacidad de transformación.

REE, como gestor del sistema eléctrico es responsable del desarrollo y ampliación de la red, de realizar su mantenimiento, de gestionar el tránsito de electricidad entre sistemas exteriores y la península y garantizar el acceso de terceros a la red de transporte en régimen de igualdad.

Evolución de la red de transporte						
⁽¹⁾ Los datos del 2004 y 2005 reflejan adquisiciones de activos por Red Eléctrica a otras empresas.						
km de circuito	2004⁽¹⁾	2005⁽¹⁾	2006	2007	2008	2009
400 kV	16.548	16.808	17.004	17.134	17.686	17.977
220 kV y menor	11.461	16.288	16.498	16.535	16.636	16.777
Total	28.009	33.096	33.502	33.669	34.322	34.754

Evolución de las posiciones de subestaciones						
⁽¹⁾ Los datos del 2004 y 2005 reflejan adquisiciones de activos por Red Eléctrica a otras empresas.						
Número de posiciones	2004⁽¹⁾	2005⁽¹⁾	2006	2007	2008	2009
400 kV	740	877	950	1.004	1.055	1.114
220 kV y menor	1.188	1.865	1.966	2.039	2.108	2.271
Total	1.928	2.741	2.915	3.042	3.162	3.385

Capacidad de transformación						
⁽¹⁾ Los datos del 2004 y 2005 reflejan adquisiciones de activos por Red Eléctrica a otras empresas.						
Potencia (MVA)	2004⁽¹⁾	2005⁽¹⁾	2006	2007	2008	2009
Total	37.216	54.209	56.009	58.459	62.859	66.259

Tabla 1: Evolución de la red de Transporte, posiciones de subestaciones y capacidad de transformación de la red eléctrica

Fuente: [1]



Las líneas de transporte terminan en las Estaciones de Transformación (E.T) donde la electricidad a 400 kV/220kV se transforma a 132kV/66kV/45kV para poder ser distribuida a los consumidores finales.

3.1.3. Distribución de la Energía Eléctrica

Los sistemas de distribución de energía eléctrica en España comprenden niveles de A.T. M.T. y B.T. y son responsabilidad de las empresas distribuidoras.

La tarea más importante de las empresas distribuidoras es garantizar la calidad del servicio eléctrico, que se refiere a la calidad del producto, a la continuidad del suministro y a la atención al cliente.

La calidad se mide mediante parámetros de carácter individual y zonal y se definen unos requisitos mínimos de calidad a partir de estos parámetros. Las zonas se dividen en urbana, semiurbana, rural concentrada y rural dispersa.

Si se incumplen los requisitos de calidad individual, se compensa a los afectados.

Si se incumplen los requisitos de calidad zonal, la empresa distribuidora debe hacer planes de inversión y desarrollo.

En España se utilizan como índices de calidad en el suministro:

- El tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada (TIEPI) en horas equivalentes/año.
- El número de interrupciones equivalentes de la potencia instalada (NIEPI) en número de interrupciones equivalentes/año.

La tabla 2 representa el TIEPI medido por zonas en España durante en 2008 y los límites establecidos que garantizan la calidad zonal. Se distinguen las zonas urbana, semiurbana, rural concentrada y rural dispersa y la potencia total instalada en cada zona. Asimismo el TIEPI se encuentra desglosado en interrupciones programadas en transporte y distribución e interrupciones imprevistas de generación, transporte, de terceros, de fuerza mayor e interrupciones imprevistas propias.

Se observa en la tabla que el total del TIEPI en cada zona no supera los límites establecidos, por lo que en 2008 se ofreció en España un servicio de calidad en los tiempos de interrupción.

Zona	U	S	RC	RD	T
Potencia Instalada (MVA)	66.186,10	49.027,79	15.951,76	8.146,71	139312,36
Nº Suministros	14800400	9174005	3343056	654439	27971900
Programadas Transporte	0	0,011	0,013	0,014	0,006
Programadas Distribución	0,078	0,204	0,332	0,465	0,174
Programadas Total	0,078	0,215	0,345	0,48	0,18
Imprevistos Generación	0,043	0,058	0,01	0,073	0,046
Imprevistos Transporte	0,013	0,055	0,009	0,017	0,028
Imprevistos Terceros	0,107	0,214	0,318	0,401	0,186
Imprevistos Fuerza Mayor	0,012	0,044	0,129	0,051	0,039
Imprevistos Propias	0,678	1,179	2,066	2,993	1,149
Imprevistos Total	0,854	1,549	2,532	3,534	1,447
Total TIEPI	0,932	1,765	2,877	4,014	1,628

Límite	2	4	8	12
--------	---	---	---	----

Tabla 2: TIEPI en España (2008)

Fuente: Apuntes de asignatura Regulación de Sistemas eléctricos.

Universidad Carlos III de Madrid

Con respecto a la forma de onda, hay que garantizar su calidad impidiendo que sus perturbaciones no alcancen unos valores inadmisibles definidos en la norma EN50160.

Dependiendo de las características de las cargas, los volúmenes de energía involucrados, y las condiciones de fiabilidad y seguridad con que deban operar, los sistemas de distribución se clasifican en industriales, comerciales, urbanos y rurales.

La distribución de la energía eléctrica desde las subestaciones de transformación de la red de transporte se realiza en dos etapas:

La primera está constituida por la red de reparto, que distribuye la energía, normalmente mediante anillos que rodean los grandes centros de consumo, hasta llegar a las estaciones transformadoras de distribución (E.T). Las tensiones utilizadas en esta etapa de reparto están comprendidas entre 132 y 25 kV. Intercaladas en estos anillos están las subestaciones transformadoras (S.T.) de distribución, encargadas de reducir la tensión desde el nivel de reparto al de distribución en media tensión.

La segunda etapa la constituye la red de distribución propiamente dicha, con tensiones de funcionamiento de 3 a 30 kV y con una característica muy radial. Esta red cubre la superficie de los grandes centros de consumo (población, pequeña y mediana industria, etc.), uniendo las subestaciones transformadoras de distribución con los centros de transformación, que son la última etapa del suministro en media tensión, ya que las tensiones a la salida de estos centros es de baja tensión (20kV/380V).

Las líneas que forman la red de distribución se operan de forma radial, sin que formen mallas, al contrario que las redes de transporte y de reparto.

Cuando existe alguna avería, un dispositivo de protección la detecta y abre el interruptor que alimenta a dicha red para poder operar sin que el resto de la red se vea afectado por ello.

3.2. La demanda de energía eléctrica

Uno de los mayores problemas que tiene el sistema eléctrico es que no se puede almacenar electricidad, al menos en grandes dosis, por lo que hay que ajustar la producción de energía eléctrica a la demandada por los consumidores en cada momento.

La demanda de energía eléctrica nacional resulta ser una curva característica, que se repite con un patrón diario. Debido a esa periodicidad se puede estimar con una gran exactitud, lo que utiliza el operador del sistema para asegurar una operación segura del sistema eléctrico.

La evolución de la demanda se puede seguir en la página web de Red Eléctrica. El operador utiliza 3 curvas: demanda real, demanda prevista y producción horaria operativa.

La demanda real (curva amarilla) refleja el valor instantáneo medido de la demanda de energía eléctrica.

La previsión de la demanda (curva verde) es elaborada por REE con los valores de consumo en periodos precedentes similares, corrigiéndola con una serie de factores que influyen en el consumo como laboralidad, climatología y actividad económica.

La programación horaria operativa (línea escalonada roja) es la producción programada para los grupos de generación a los que se haya adjudicado el suministro de energía en la casación de los mercados diario e intradiario, así como en los mercados de gestión de desvíos y regulación terciaria. Estos dos últimos son gestionados por Red Eléctrica de España teniendo en cuenta la evolución de la demanda.

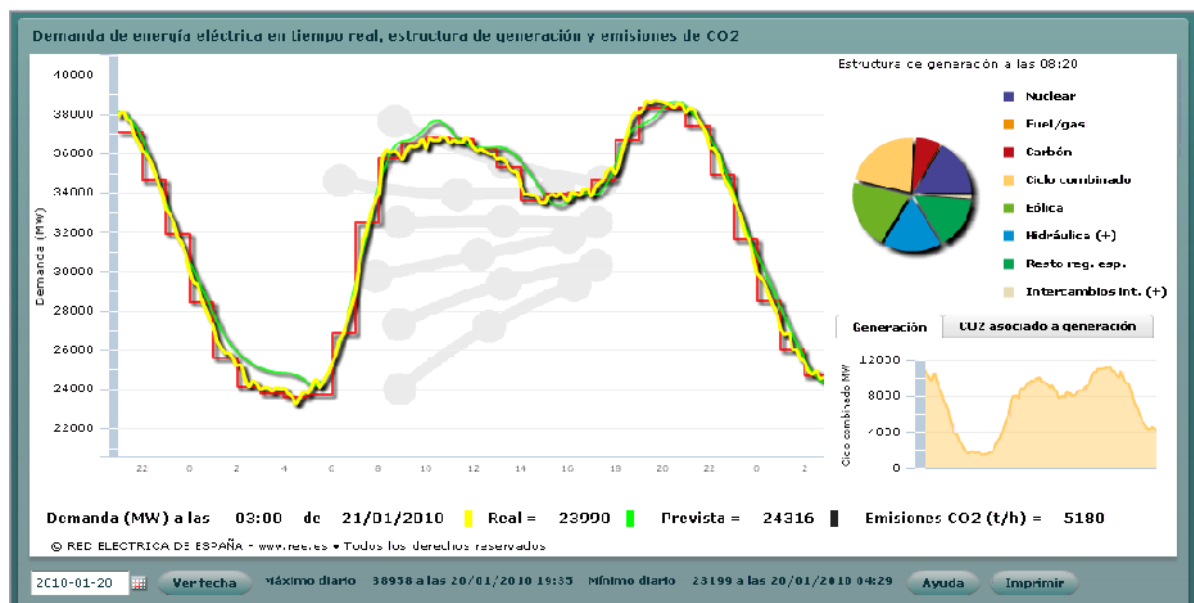


Figura 6: Demanda de energía eléctrica del 20-01-2010

Fuente [1]

En la figura 6 se observa claramente la gran exactitud con la que se aproxima la curva estimada a la real, y además el ajuste entre potencia demandada y potencia producida. Se puede distinguir entre horas valle, las horas en las que la demanda alcanza los mínimos y las horas pico, donde se alcanzan los máximos.

El mínimo se alcanza más o menos sobre las 4 de la madrugada, va aumentando hasta alcanzar su primer pico sobre las 12, luego disminuye el consumo hasta las 15 o las 16 horas y a continuación aumenta el consumo hasta el 2º pico del día, que en invierno se da más o menos a las 22 horas, hasta que progresivamente disminuye de nuevo en la madrugada.

Además, los picos de demanda de electricidad varían según sea la época del año en la que se encuentran. Así el mayor pico de demanda se da en invierno y varía en torno a los 45000 MW y los menores picos se alcanzan en verano con una demanda en torno a los 40000MW. No obstante el día de menor demanda del año suele ser el 1 de Enero debido a la festividad del año nuevo. Las gráficas siguientes dan idea de la diferencia de picos entre las distintas épocas del año y de la evolución de estos picos entre 2005 y 2009.

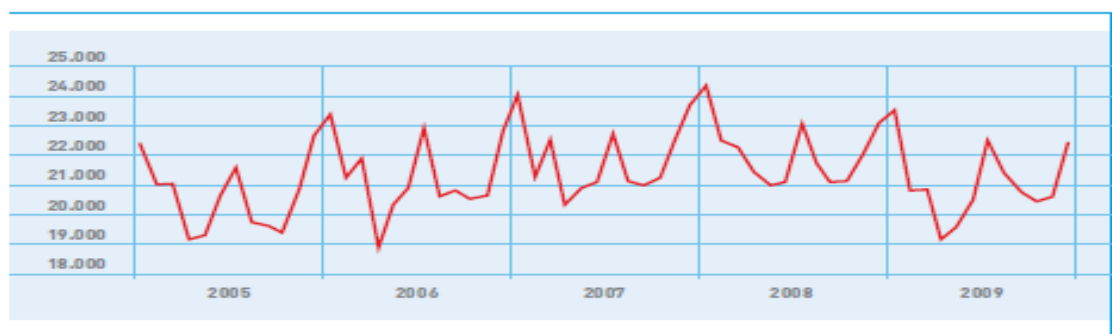


Figura 7: Consumo de energía mensual entre 2005 y 2009

Fuente: [1]

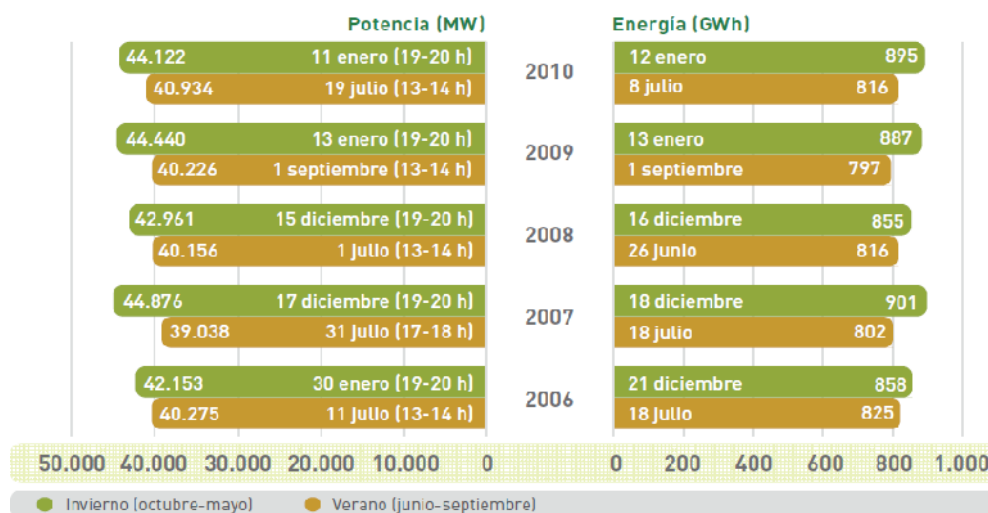


Figura 8: Máxima demanda de potencia media horaria y de energía diaria

Fuente: [1]

El máximo pico de Potencia se alcanzó el 17 de Diciembre de 2007 sobre las 18:00 con una potencia de 44876 MW.

El máximo de Energía diaria demandada se produjo el día 18 de Diciembre de 2007 con un total de 901GWh de electricidad.

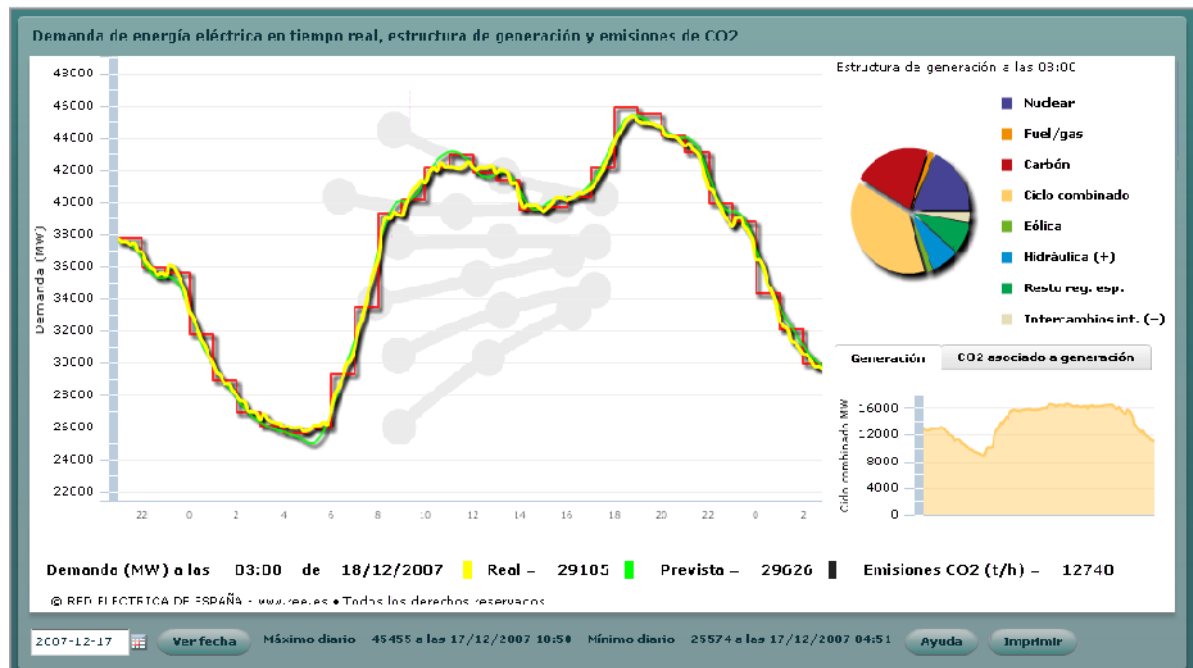


Figura 9: Demanda de energía eléctrica del 18-12-2007

Fuente [1]

Por la noche hay una disminución muy acentuada del consumo, lo que complica la operación del sistema, puesto que hay que realizar continuas maniobras de conexión y desconexión de muchas centrales para ajustar la producción. Para ayudar a esta gestión, sería deseable una mayor y mejor gestión de la demanda. Según informes de Red Eléctrica, la integración del coche eléctrico en España ayudará a rellenar estos valles aplanando la curva y por tanto consiguiendo una operación mucho más segura y eficiente del sistema.

Durante los últimos años, la demanda de energía eléctrica nacional ha crecido de una forma constante (entre un 2 y un 4 % anual) hasta 2008, en 2009 disminuye bruscamente ese crecimiento hasta un valor de -4,8 % con respecto del año anterior. Este comportamiento de la demanda se puede atribuir en parte a la crisis económica que comenzó en 2008 a azotar el país y que como consecuencia, indujo a un ahorro general de electricidad por parte de los consumidores. En 2010 el crecimiento de la demanda se ha recuperado, volviendo a su valor normal de crecimiento, presentando un crecimiento del 2,9 % con respecto a 2009.

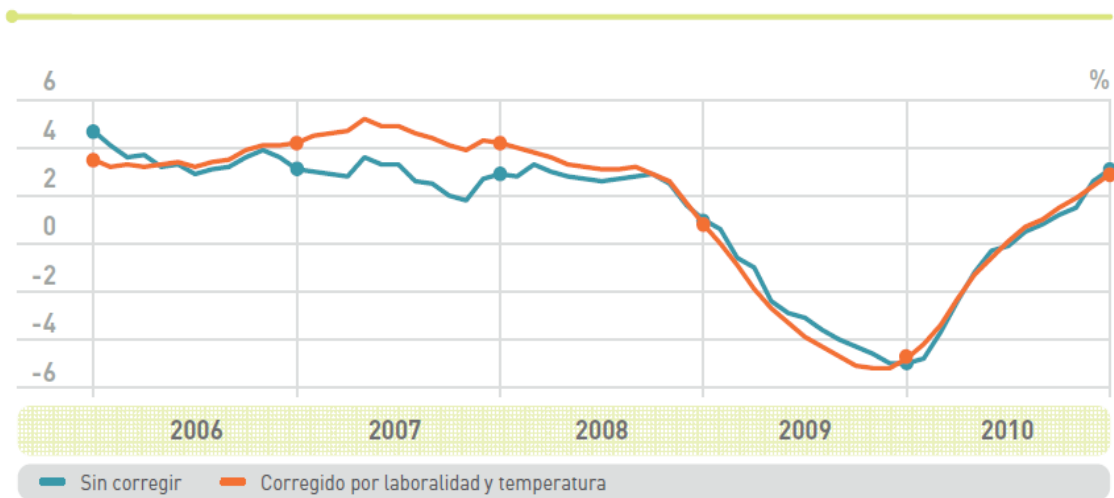


Figura 10: Crecimiento anual de la demanda

Fuente [1]

Capítulo 4

Las Industrias y sus patrones de consumo eléctrico

Una parte muy importante de la energía consumida en España se concentra en el consumo industrial. Las industrias se alimentan tanto de la red de distribución a una tensión de hasta 132 kV como de la red de transporte en sus tensiones de 220 kV y 400 kV.

La siguiente figura muestra el consumo de energía eléctrica industrial anual entre 1995 y 2007.

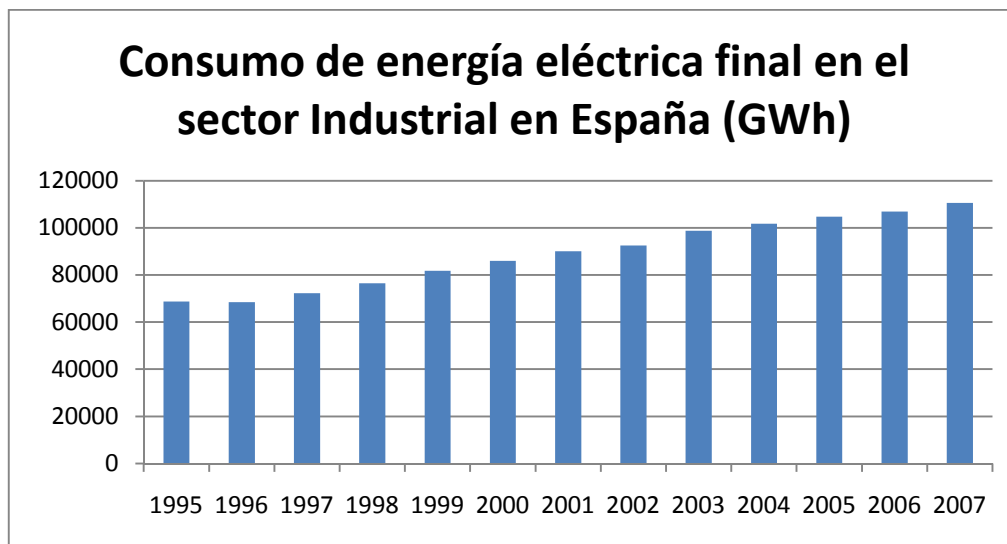


Figura 11: Consumo de energía eléctrica final en el sector Industrial (GWh)

Fuente: [2]

El gráfico de la figura 11 muestra el aumento del consumo de electricidad en la industria en los últimos años, siendo en 2007 de 110630 GWh de electricidad consumida.

En este PFC se estudian las industrias grandes consumidoras de electricidad. Para estas industrias, la gestión de su demanda eléctrica es muy importante debido a que les genera un gran coste (hasta 3 veces el salario de los empleados) que se hace necesario de optimizar. El perfil de consumo de electricidad de estas industrias es predecible y está integrado en la base de la curva de demanda eléctrica nacional. Otra característica muy importante de este tipo de industrias es que tienen una alta demanda de electricidad en las horas valle de la demanda nacional, en las que consumen como mínimo un 55% de su consumo anual debido al bajo precio de la electricidad en dichas horas. El carácter de gran demanda en horas valle es beneficioso para el sistema, ya que se ayuda a aplanar la curva de demanda eléctrica nacional, que ofrece unos valles muy acentuados y que dificultan una operación segura y eficiente del sistema eléctrico.

A continuación se explican los procesos industriales de siderurgia, metalurgia del zinc y obtención de gases industriales:

4.1. La Industria siderúrgica

La siderurgia es el conjunto de técnicas cuyo objetivo es obtener hierro, o sus aleaciones, principalmente acero.

El hierro puro tiene muy pocas aplicaciones industriales. No se encuentra libre en la naturaleza ya que químicamente reacciona con facilidad con el oxígeno del aire para formar óxido de hierro. El óxido se encuentra en cantidades significativas en el mineral de hierro, el cual es una concentración de óxido de hierro con impurezas y materiales térreos.

El acero es básicamente una aleación de hierro y carbono (C), alrededor de un 0,05% hasta un 2% de contenido en C. También puede llevar más aleantes como pueden ser Níquel, Cromo, Wolframio, etc.

Una ventaja del acero que lo hace diferente a otras aleaciones, además de su gran resistencia mecánica, es que sus propiedades pueden ser modificadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos térmicos, mecánicos y termoquímicos. Esto ha dado lugar a que la industria siderúrgica se haya hecho imprescindible en la actualidad debido a la posible fabricación de distintos aceros, a las propiedades mecánicas de los aceros y a la facilidad para modificar esas propiedades.

En la siguiente tabla se observa la producción de los distintos tipos de acero en miles de toneladas en el periodo de 2005 a 2007.

Producción (miles de tm)	2006	2007	2008	%Variación 07-08
Producción de acero total	18401	18999	18640	-1,9%
Aceros no aleados	16397	17077	16896	-1,1%
Aceros Inoxidables	1257	1105	998	-9,7%
Otros aceros aleados	748	817	746	-8,7%

Tabla 3: Producción de acero total en España en 2006, 2007, 2008

Fuente: [3]

Producción (miles de tm)	2007	2008	%variación
Arrabio	3976	3784	-4,8
Acero bruto	18999	18640	-1,9
Total productos laminados en caliente	18749	18132	-3,3
Productos largos laminados en caliente	12547	12378	-1,3
Productos planos laminados en caliente	6202	5754	-7,2
Chapas laminadas en frío (todas calidades)	3765	3646	-3,2
Productos planos recubiertos	2783	2493	-11,0

Tabla 4: Producciones siderúrgicas en España en 2007 y 2008

Fuente: [3]

La producción española de acero bruto alcanzó en el año 2008 18640 millones de toneladas. En España la producción de acero bruto a partir de horno eléctrico supone el 78% del total, mientras que la media mundial es del 32%. La evolución de los distintos productos en 2008 fue a menos, ya que la producción de aceros no aleados disminuyó un 1,1% con respecto a 2007, la de otros aceros aleados disminuyó un 8,7% y la de aceros inoxidables disminuyó un 9,7%.

Algunas de las empresas españolas destacadas en la producción de acero son Arcelor (producción integral) y Celsa (producción no integral).

4.1.1. Proceso integral de producción de acero

A continuación se muestra el diagrama de funcionamiento de una planta integral.

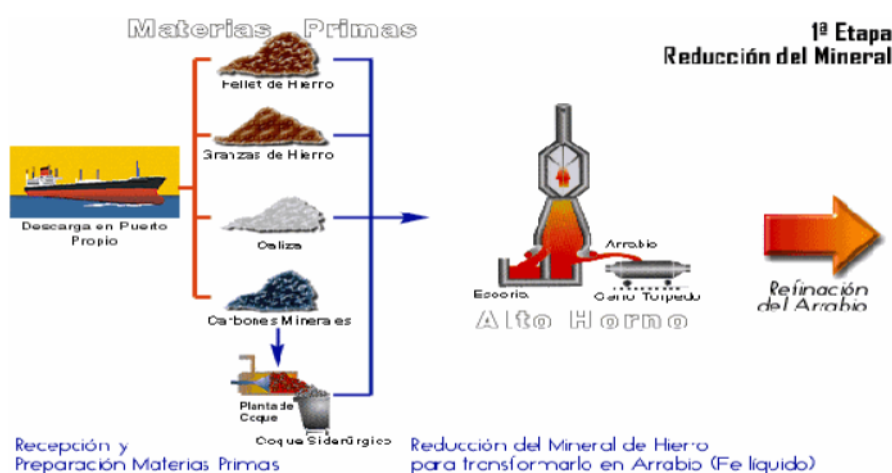


Figura 12: Esquema de funcionamiento de planta integral, producción de arrabio

Fuente: Fuente: [5]

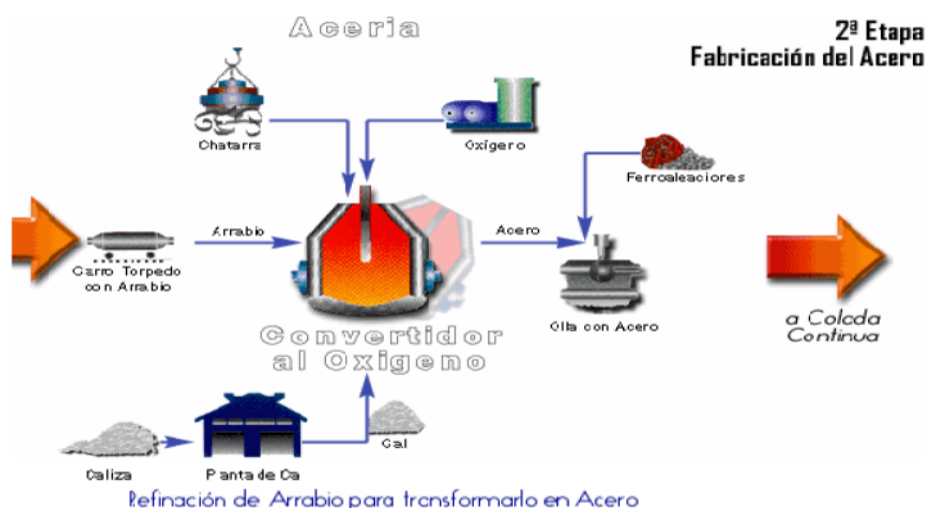


Figura 13: Esquema de funcionamiento de planta integral, convertidor de acero

Fuente: Fuente: [5]

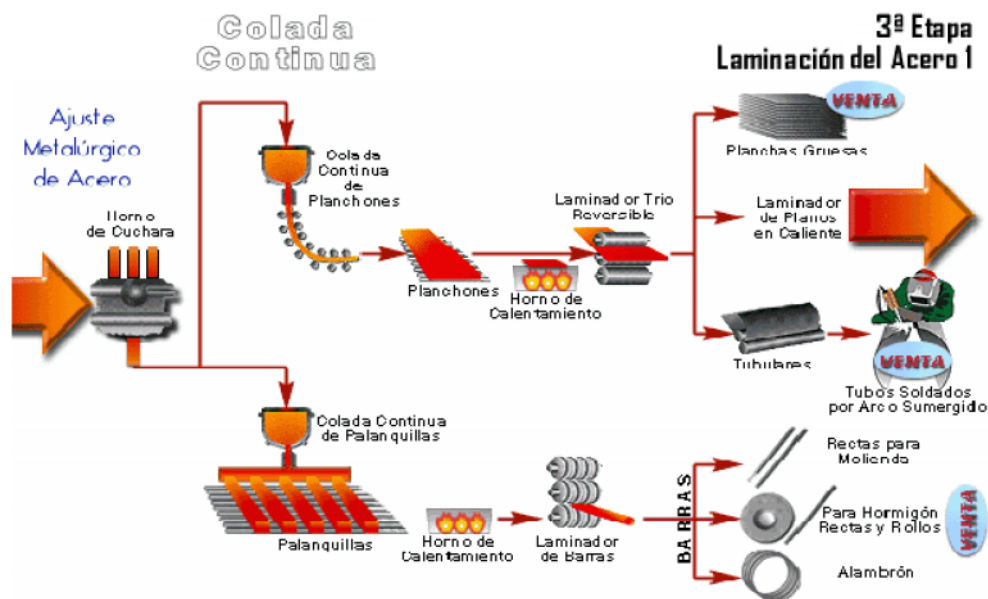


Figura 14: Esquema de colada continua de planchones y palanquillas

Fuente: [5]

El proceso de producción de acero en este tipo de plantas consta de varias etapas:

La primera etapa incluye la descarga, clasificación, pesaje y almacenamiento de las materias primas necesarias para la fabricación del acero: mineral de hierro, carbones metalúrgicos y caliza, básicamente.

El mineral de hierro se obtiene de las minas, y mediante un proceso se pueden convertir a pellets de hierro para su mejor aprovechamiento.

La caliza tiene la función de formar compuestos para escoria con la sílice, del cual es necesario deshacerse para evitar desperdicio de hierro.

Los carbones metalúrgicos se convertirán en coque, el cual tiene varios usos en la industria siderúrgica:

- Es el combustible que se utiliza para el calentamiento de los hornos.
- Produce el monóxido de carbono que sirve para reducir y para transformar los minerales de hierro en arrabio o fundición.
- Es el soporte de la carga y responsable de la permeabilidad de la misma.

Para producir el coque, la mezcla de carbones metalúrgicos se somete a un proceso de destilación seca, calentándose a temperaturas entre 1000 y 1200 °C en ausencia de oxígeno, hasta eliminar prácticamente la totalidad de la materia volátil del carbón. Este proceso se realiza en la planta de coque, que cuenta con varios hornos y que suele encontrarse anexa a la planta siderúrgica.



Figura15: batería de hornos de coque

Fuente: [9]

La coquización deja como subproducto gas de alto poder calorífico, que es utilizado como combustible para procesos de la industria, entre ellos, calentar las estufas de aire para los altos hornos.

Una vez obtenido el coque se procede a la obtención de arrabio (hierro fundido después de eliminar el óxido y las impurezas del mineral de hierro) mediante la reducción del mineral de hierro. Para ello se aprovecharán los gases de la combustión del coque.

La reducción se realiza en los altos hornos (figura 16). Por el tragante (parte superior del horno) se cargan por capas los minerales de hierro, la caliza y el coque. La combustión del coque es realizada por la inyección de aire precalentado a 1.000 °C por unas toberas en la parte inferior del horno, generando elevadas temperaturas y gases reductores que actúan sobre el mineral y la caliza, transformándolos en arrabio (hierro líquido) y en escoria, respectivamente.

Tras la reducción del mineral se procede a realizar la colada. Esta consiste en extraer los elementos fundidos del crisol (parte inferior de los altos hornos). La escoria es separada del arrabio por su menor densidad, se hace fluir hacia un foso, y allí es apagada y granulada por un chorro de agua.

El arrabio se carga en unos recipientes llamados vagones torpedo, para trasladarlos a la siguiente fase del proceso siderúrgico. Aquí se le somete a un proceso de desulfuración inyectándole una mezcla de cloruro y carbonato de calcio, reaccionando el calcio con el azufre del arrabio.

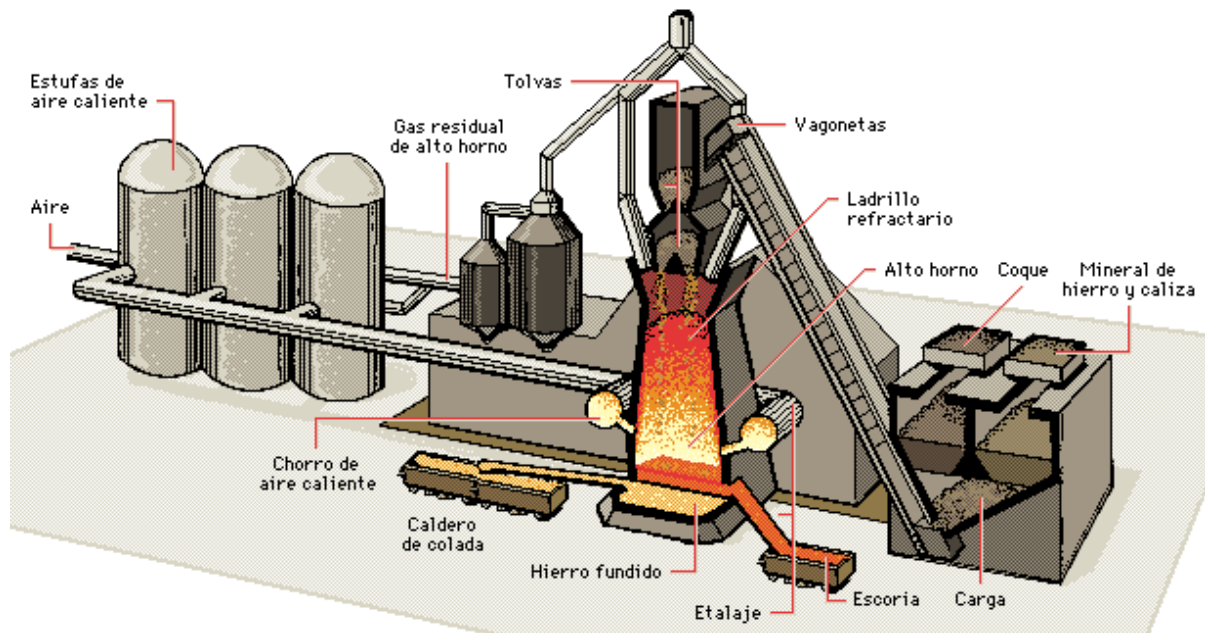


Figura 16: Esquema de funcionamiento de un alto horno

Fuente: [10]

El arrabio resultante de los altos hornos se carga en un convertidor de arrabio junto con chatarra de acero fría (cerca del 25%). A continuación, se hace descender hacia la carga una lanza refrigerada por agua para evitar su fusión y se inyecta sobre ella oxígeno puro.

Además también se agrega cal y otros materiales fundentes a la mezcla. El resultado es la oxidación del exceso de carbono y de las impurezas. El residuo se agrega a la capa flotante de escoria.

Estas reacciones de oxidación son exotérmicas, lo que causa la fusión de la chatarra añadida sin necesidad de agregar ningún combustible.

Una vez finalizada la inyección de oxígeno se analiza la composición del acero y se mide su temperatura, agregando al final los elementos aleantes ajustando su composición.

A veces es necesario someter el acero a un proceso de desgasificación, introduciendo en la cuchara una campana conectada al vacío que facilita la extracción de los gases contenidos en el interior del metal.

El acero líquido se recibe en cucharadas, se envía a un proceso de metalurgia secundaria y luego al vaciado de colada continua de planchones o palanquillas según su composición química.



4.1.2. Proceso no integral de producción de acero

El proceso industrial en las plantas no integrales utiliza como materia prima fundamental chatarras, fundiéndolas en una acería constituida por un horno eléctrico, para obtener acero en forma de semiproductos, que pueden ser planchones o palanquillas.

Posteriormente este semiproducto es laminado en trenes de laminación para obtener productos acabados con diferentes secciones.

La chatarra es la materia prima básica para la fabricación de acero en hornos eléctricos.

La calidad de la chatarra es un factor muy importante, dado que según sea la calidad, así será la de los aceros obtenidos, por ello se la dedica una especial atención.

Esto se consigue obteniendo la materia prima de mercados fiables y con un estricto control en la recepción de la chatarra.

Los controles que hay que hacer según su procedencia son:

- Inspección por personal especializado en origen para comprobar que en el momento de su carga la chatarra se ajusta a las normas internacionales, establecidas a tal efecto.
- Inspección visual durante la descarga.
- Control exhaustivo en fábrica, independientemente de su origen.

Con estos controles se pretende eliminar la presencia de todos los elementos nocivos o extraños, de materias explosivas e inflamables, así como comprobar que las medidas de las piezas, están dentro de las normas establecidas.

También se efectúan análisis espectrométricos o de otro tipo, de los materiales que ofrezcan dudas sobre su composición química.

Además, se adicionan a la chatarra otras materias primas como ferroaleaciones, cal, feldespatos, carbón, etc. con el objetivo de eliminar impurezas.

La acerías suelen constar de tres instalaciones fundamentales: Horno eléctrico, horno cuchara y colada continua.

En el Horno Eléctrico, se realiza la fusión de la chatarra y demás materias primas, necesarias para obtener la composición química deseada. Esta se controla durante el proceso mediante espectrómetros de emisión de lectura directa. En esta fase de fusión se consume una gran cantidad de energía eléctrica.

El acero líquido se vuelca en el Horno Cuchara, y en este, libre ya de escoria, se realiza el afino y ajuste definitivo de la composición química del acero, tomando tantas muestras como sean necesarias, hasta obtener la composición química exactamente deseada. También se realizan análisis adicionales de la composición para un mejor control del carbono y el azufre.

El último paso consiste en transformar el acero líquido en semiproducto. Esto se consigue en el proceso de colada continua, donde se lleva a cabo la solidificación del acero y la obtención de los semiproductos.

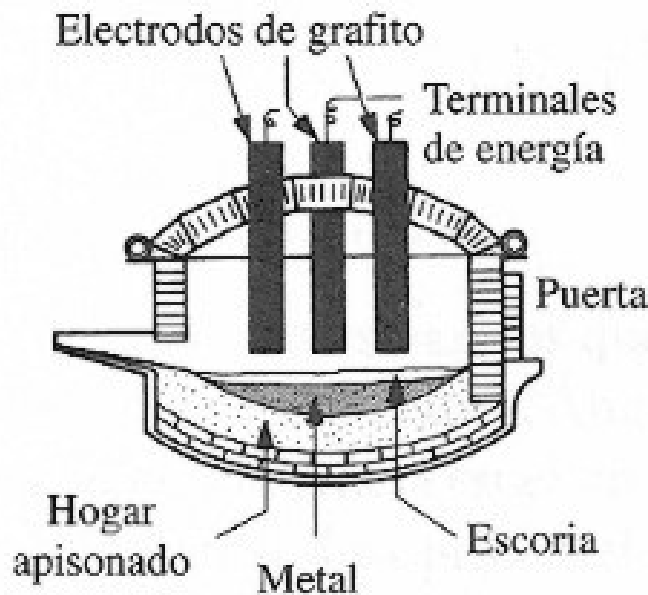


Figura17: Esquema de un horno eléctrico de arco indirecto

Fuente: [11]

4.1.3. Colada continua de Planchones

El objetivo de la colada continua es solidificar el acero en productos de sección constante.

El acero líquido de la cuchara es vaciado a una artesa que se comunica por el fondo con un molde que es enfriado por agua, en el se inicia el proceso de solidificación del acero. La solidificación se completará a través del trayecto.

El planchón que se produce es una cinta continua con un ancho y espesor específicos y que se va cortando a la salida según los requerimientos.

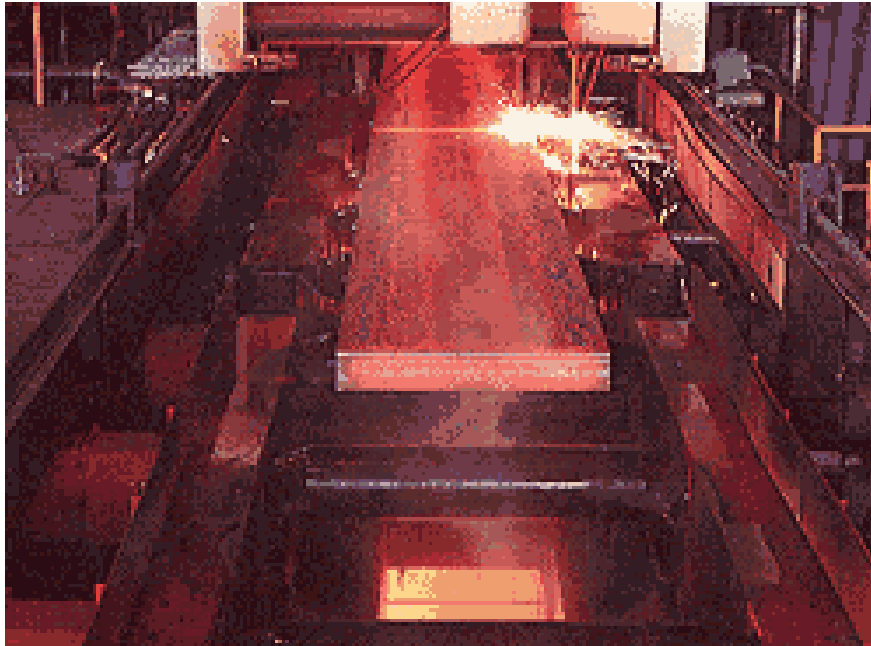


Figura 18: Colada continua de planchones

Fuente: [5]

4.1.4. Colada continua de palanquillas

La máquina de colada continua de palanquillas, suele estar formada por varias líneas conformadas por tubos de cobre de sección cuadrada con refrigeración interna por agua, con sistema de enfriamiento controlado a lo largo de la hebra y un agitador electromagnético al final de la hebra.

Una vez que se ha formado una piel suficientemente gruesa dentro del molde, la hebra inicia su recorrido curvo dentro de la máquina, sometida a la acción de rociadores de agua controlados en función de la velocidad de la máquina.

Al término de esta zona la hebra es enderezada mediante rodillos y cortada a la dimensión especificada por sopletes de oxígeno-propano.

4.1.5. Laminación de productos terminados

- Laminador de barras:

Las palanquillas se procesan en este laminador en el cual después de ser recalentadas en un horno se laminan en pases sucesivos y se transforman en barras redondas lisas o con resaltes para hormigón, todos ellos, productos terminados, utilizados como materiales de construcción y en la manufactura de alambres, clavos, tornillos, pernos, etc.

- Laminador de planos en caliente:

Los planchones que produce la Colada Continua son sometidos a laminación en caliente.



El proceso comienza calentando el material en un horno. Una vez alcanzada la temperatura requerida, los planchones son reducidos en su espesor y aumenta su longitud, haciendo tantas laminaciones como se requiera el producto final.

Una parte de los productos obtenidos en este laminador, va directamente al mercado, tanto en forma de rollos o planchas, y la otra parte continúa su proceso en el Laminador de Planos en frío.

- Laminador de planos en frío:

La laminación en frío se verifica a temperatura ambiente. Se utiliza cuando el espesor de la chapa requerido es muy pequeño y además se precisa un buen acabado superficial.

Las bobinas laminadas en caliente salen con una capa de óxido superficial que es preciso eliminar antes de la laminación en frío para que no se produzcan defectos superficiales importantes en la chapa.

4.1.6. Consumo de Energía en Siderurgia

En el proceso de obtención integral del acero se consume una gran cantidad de Energía. Los procesos en los que se consume son:

- Planta integral:

Transporte de los distintos materiales por las distintas fases del proceso, carros torpedo, cintas transportadoras, etc.

En la batería de hornos para la producción de coque metalúrgico se utiliza energía eléctrica y térmica del gas producido de la coquización, que es recirculado.

En el alto horno, la Energía consumida es debida en parte a la combustión del coque y a la energía eléctrica.

En el convertidor de acero. Se consume energía en el soplado del oxígeno, ya que la chatarra fría se funde por sí sola al ser exotérmicas las reacciones del oxígeno con las impurezas del arrabio.

La colada continua y la laminación de productos terminados tiene una gran demanda de consumo de energía.

- Planta no integral:

La mayor parte de la energía consumida es por la fusión de las materias primas en los hornos eléctricos, lo que ocasiona un gran consumo.

La carga de materiales en los hornos y su transporte, la colada continua y la laminación generan un gran consumo de energía.

El consumo eléctrico en una planta siderúrgica se suele dar en las horas donde más barata es la electricidad. Es decir, este tipo de industria consume a potencia nominal sólo por la noche y fines de semana, como indican las siguientes gráficas, que corresponden a los patrones de consumo eléctrico de producción de acero no integral. Se puede considerar que el consumo de estas plantas es modular.

Las gráficas incluidas en este apartado están normalizadas de forma unitaria con respecto a la potencia nominal de la planta.

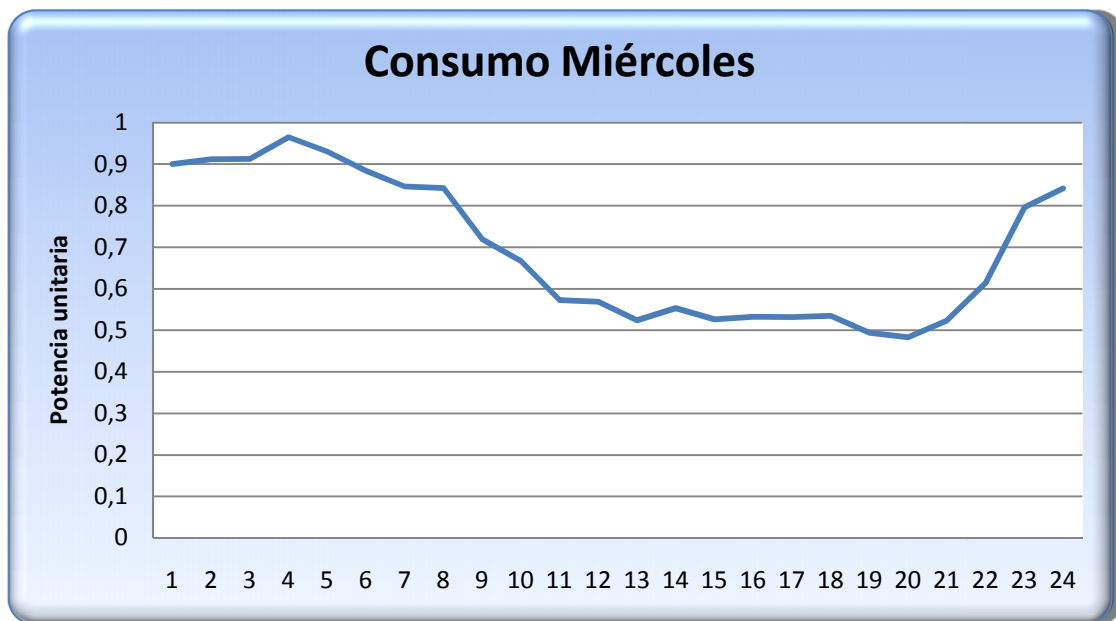


Figura 19: Patrón de consumo eléctrico entre diario en planta siderúrgica

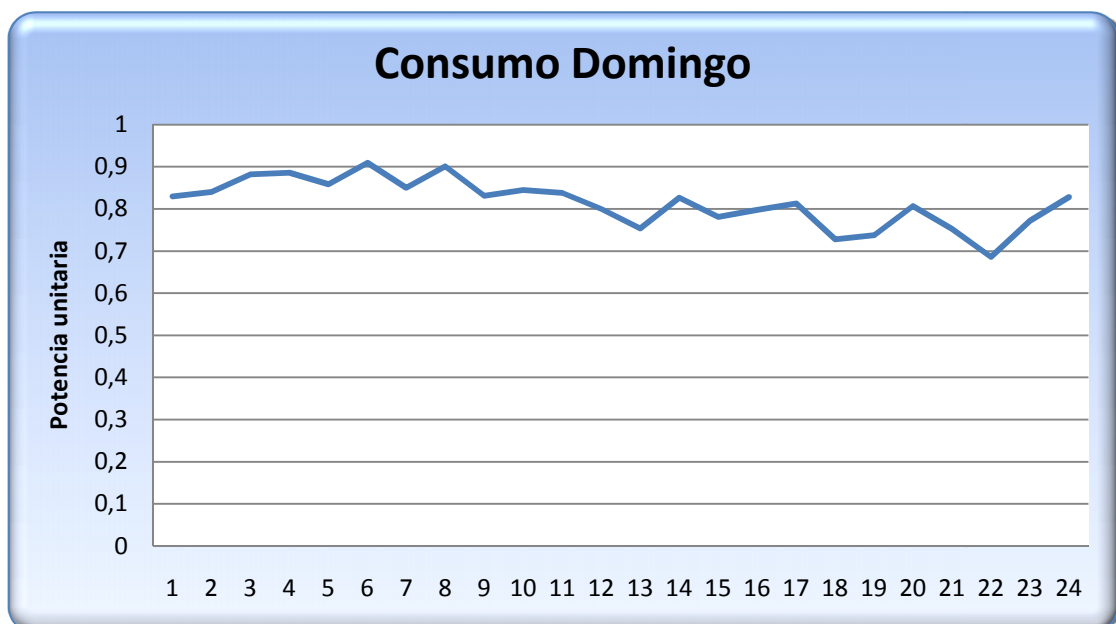


Figura 20: Patrón de consumo eléctrico en domingo en planta siderúrgica

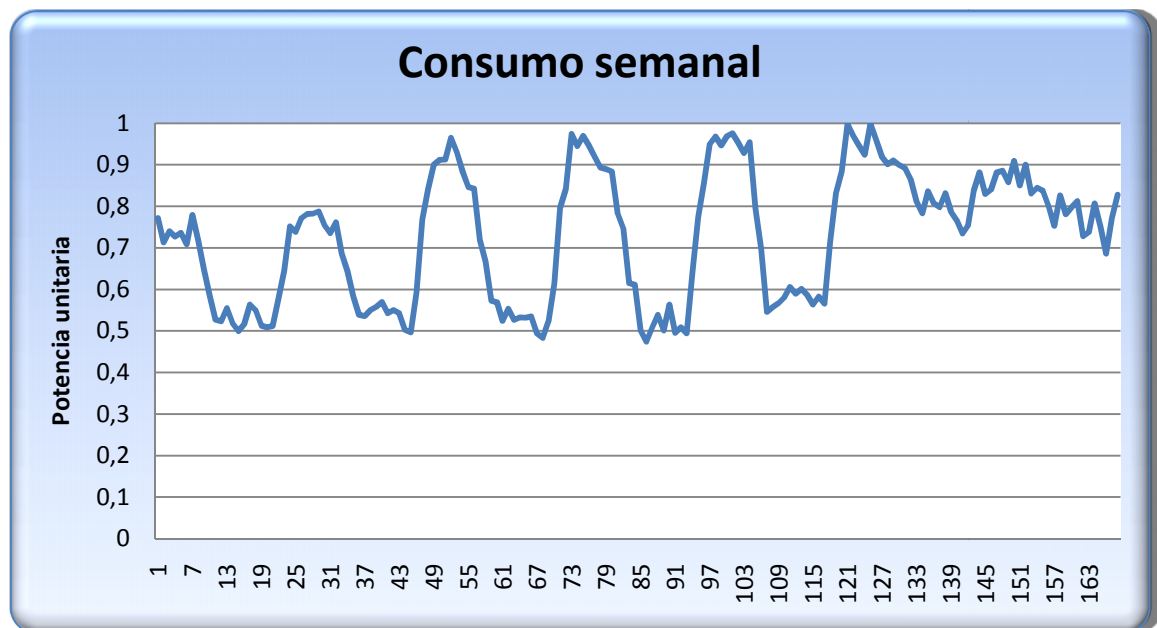


Figura 21: Patrón de consumo semanal de industria siderúrgica

Se observa la demanda modular de las industrias siderúrgicas, diaria, semanal y su patrón de consumo, destacando los momentos cuando la electricidad está más barata.

4.2. La Industria de la extracción de zinc

En el apartado de metales el PFC se centra en la producción de zinc, que es uno de los metales no férricos más utilizados en la industria y puede servir como referencia para el estudio del consumo eléctrico de la metalurgia no férrea.

El zinc es el tercer metal no férreo más utilizado del mundo (después del aluminio y del cobre). Es un metal blanco ligeramente azulado y brillante, quebradizo cuando está frío, pero se vuelve maleable y dúctil entre 100 y 150°C.

Tiene muy buenas características para aplicaciones industriales, lo que lo convierte en un elemento muy valioso en la industria, y hace que sea necesaria su producción a nivel mundial.

Una característica excepcional del zinc es su propiedad natural para proteger al hierro y al acero contra la corrosión, principalmente mediante el recubrimiento denominado galvanización extendiendo la vida útil de las estructuras y productos de acero.

Otra buena característica que tiene es su propiedad para alearse con el cobre dando lugar al latón, que es una aleación de cobre y zinc. Tiene aplicaciones tradicionales en grifería, herrajes, picaportes, lámparas y objetos decorativos, construcción naval, instrumentos musicales, etc.

El zinc también se puede usar para almacenar energía en baterías. Las baterías zinc-aire se encuentran en fase avanzada de experimentación en vehículos eléctricos y otras aplicaciones.

Cada año se utilizan más de diez millones de toneladas de zinc primario y reciclado.

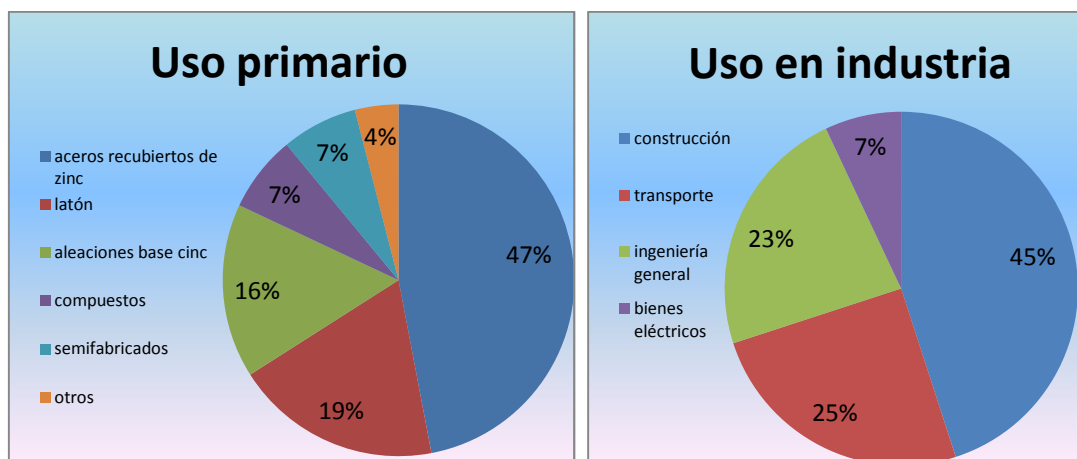


Figura 22: Uso como materia prima y uso en la industria de zinc en 2003

Fuente: [18]

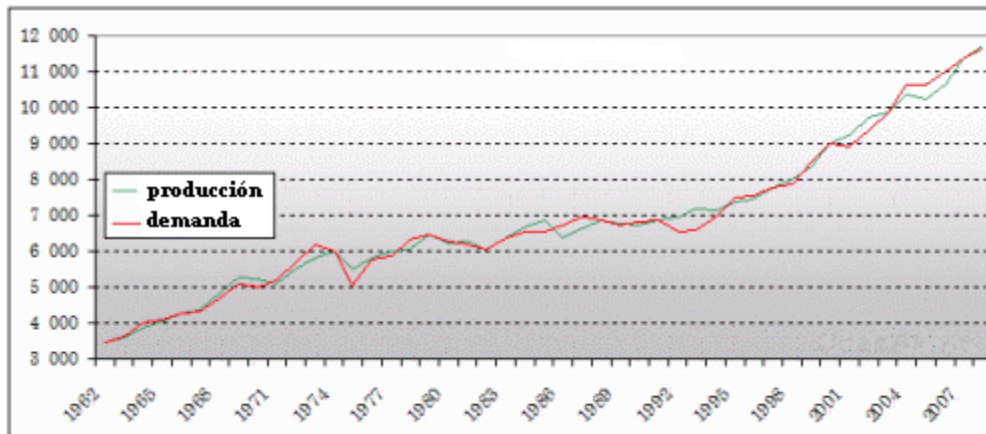


Figura23: Producción y demanda mundial anual de zinc (miles tm/año) durante el periodo 1962-2010.

Fuente: [16]

En la siguiente gráfica se puede ver claramente que Asia es el principal productor del metal, al menos hasta 2003 seguido de Europa, América y África.

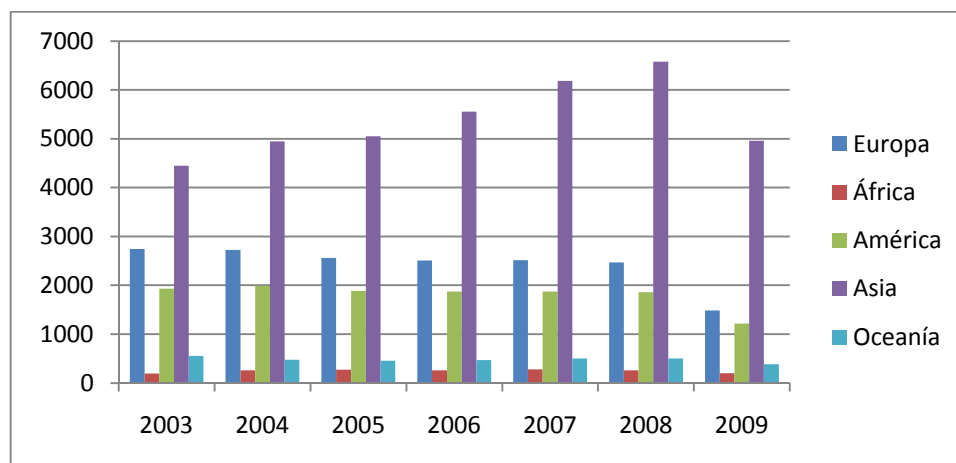


Figura 24: Producción mundial de zinc por continentes (miles tm/año) durante el periodo de 2003-2009

Fuente: [13]

La producción mundial de zinc en 2007 alcanzó los 10,9 millones de toneladas. Asia es el primer continente productor de zinc, seguida de Europa, América, Oceanía y África respectivamente.

La empresa española más importante dedicada a la producción de zinc es Asturiana de Zinc S.A. En 2007 se trataron en esta empresa 879.47 toneladas de concentrado de zinc. La producción de zinc fundido fue de 478.031 toneladas y la de zinc vendible de 458.207 toneladas. La producción de aleaciones fundidas y galvanizadas fue de 18.339 y 130.098 toneladas respectivamente. Asimismo, durante el año 2007 se obtuvieron 671.355 toneladas de ácido sulfúrico vendible y 14.620 toneladas de concentrado de plata.

Peso atómico	65,38 g/mol
Densidad	7,14g/cm ³
Punto de fusión	419,4°C
Punto de ebullición	907°C a 760mm/Hg
Calor específico	0,0925cal/g °C

Tabla 5: Propiedades físicas del zinc

Fuente: [15]

4.2.1. Obtención del zinc

Existen varios procesos que conducen a la obtención del zinc metal: procesos de reducción térmica, proceso de retortas horizontales, proceso de retortas verticales, proceso electro térmico, proceso ISF y el proceso electrolítico, siendo este último el más utilizado produciendo el 85% del zinc mundial.

Los minerales de los que se extrae el zinc por proceso electrolítico son la esfalerita o blenda, o la marmatita.

La blenda es un mineral compuesto principalmente por sulfuro de zinc, pero también contiene sulfuro ferroso. Cuando el porcentaje de hierro es bajo, se le llama blenda acaramelada, mientras que si su contenido de hierro es alto, se le llama marmatita.

Mineral	fórmula química	contenido Zn
Esfalerita o blenda	ZnS (cúbica)	40 - 67
Wurtzita	ZnS (hexagonal)	50 - 67
Marmatita	(Zn, Fe)S	50 - 67
Smithsonita	ZnCO ₃	52
Hemimorfita (calamina)	4ZnO·2SiO ₃ ·2H ₂ O	54
Hidrocinquita	5ZnO·2CO ₂ ·3H ₂ O	59
Zinquita	ZnO	80
Willebita	2ZnO·SiO ₂	58
Gahnita	ZnO·Al ₂ O ₃	15-35

Tabla 6: Minerales para obtención de zinc

Fuente: [14]

Al comienzo de la producción de zinc metal, se utilizaba calamina. Tan solo se precisaba una calcinación de la calamina para descomponer el silicato hidratado, y dejar un silicato activado que era reducido con carbón.

Agotados los yacimientos de calamina se comenzó a utilizar la blenda para la extracción del zinc. Actualmente casi la totalidad de la producción mundial de zinc se obtiene a partir de sulfuros concentrados por flotación, que es una técnica de concentración de minerales en húmedo, en la que se aprovechan las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas para efectuar la selección.

Una vez se ha obtenido la blenda cruda concentrada, se procede a la obtención del zinc. En este Proyecto Fin de Carrera se va a estudiar la obtención electrolítica del zinc a partir de la blenda.

4.2.2. Proceso de Obtención electrolítica de zinc

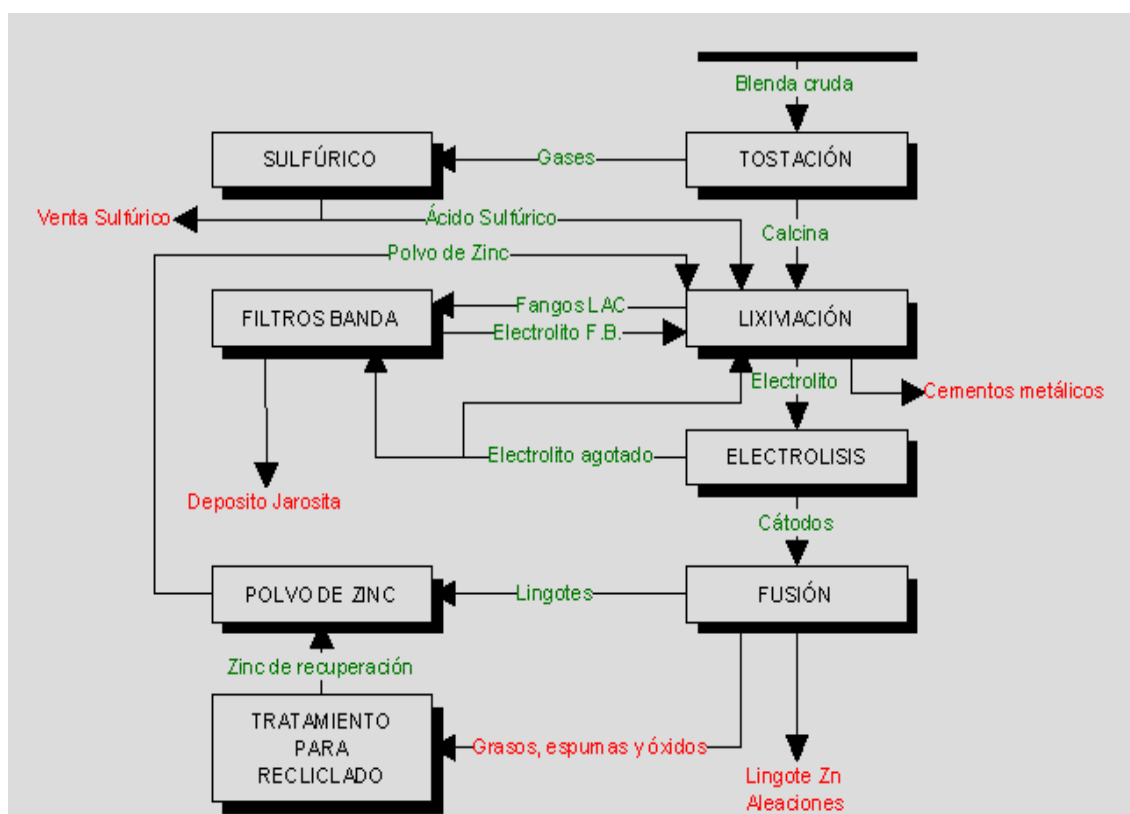


Figura 25: Diagrama de flujo simplificado del proceso electrolítico de producción de zinc.

Fuente: [15]

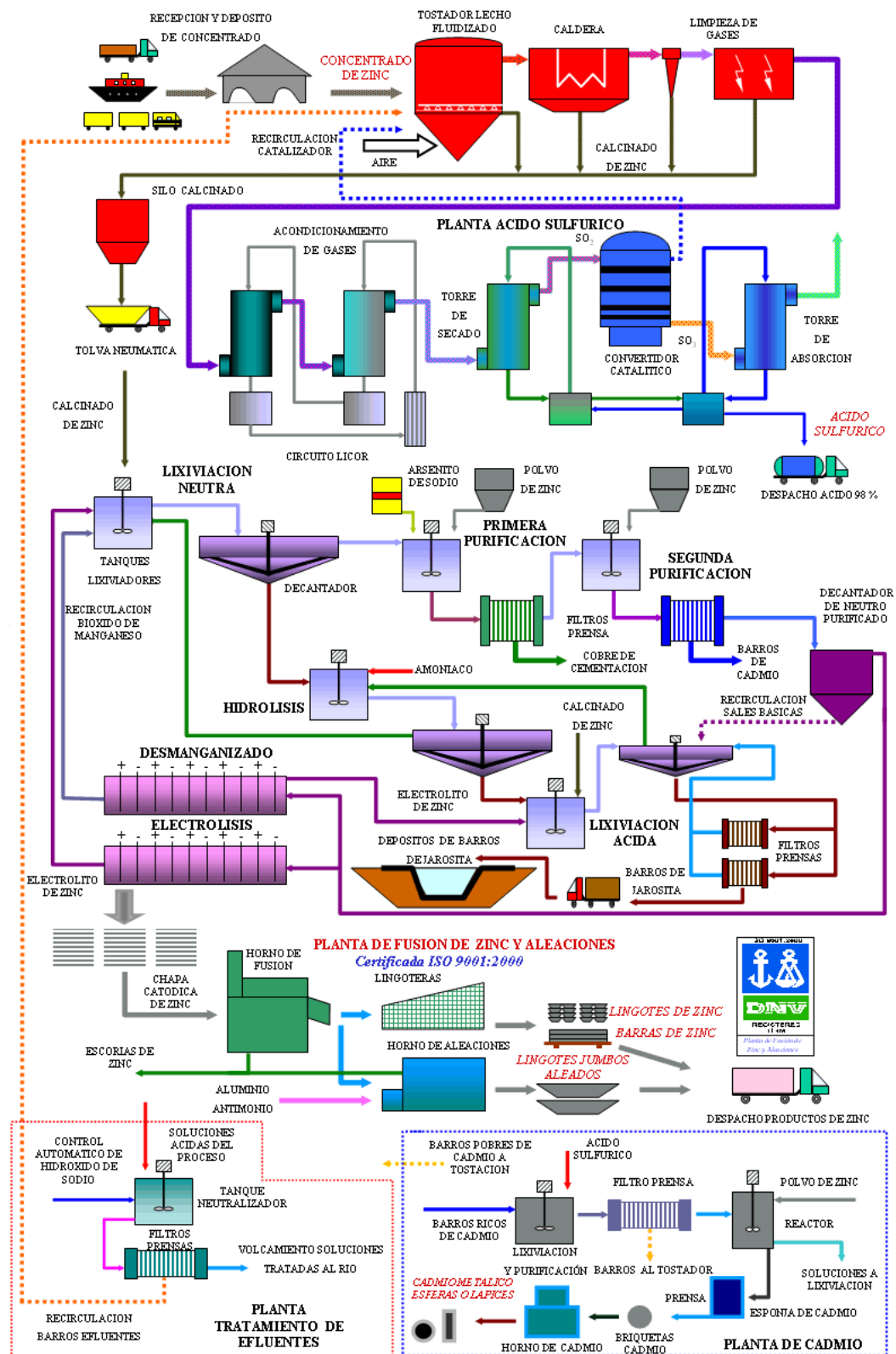


Figura 26: Esquema de funcionamiento de planta de producción de zinc

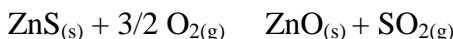
Fuente: [17]



En el diagrama de flujo (figura 25) se observan todas las fases que dan lugar a la obtención del zinc, que además deja como subproductos ácido sulfúrico, cementos metálicos y depósitos de jarosita.

La primera fase del proceso es la recepción de concentrados de sulfuro de zinc. La recepción de los diversos concentrados se realiza, por barco, aprovechando los muelles de las propias plantas (en las que se dispone de muelle), también pueden ser recibidos por carretera o por ferrocarril.

El concentrado se tuesta con aire, formándose óxido de zinc (ZnO), denominado tostado o calcina, y dióxido de azufre gaseoso (SO₂), que posteriormente se transformará en ácido sulfúrico (H₂SO₄)



Reacción de Tostado de la blenda

La conversión de la blenda en óxido debe efectuarse por encima de los 700°C, en aire y con continua agitación, controlando el exceso de aire con el fin de que no baje del 4,5% el contenido de SO₂ en los gases del horno.

Si hay hierro en la blenda, en la tostación también se formará ferrita de zinc (ZnOFe₂O₃).

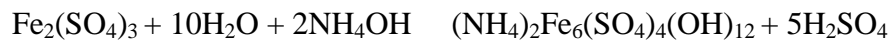
Una parte del ácido sulfúrico obtenido anteriormente se extrae como subproducto y otra parte pasa a las 2 etapas de lixiviación.

Mediante la lixiviación neutra se disuelve el tostado de la blenda en una solución diluida de ácido sulfúrico (100-150 g/l), esta concentración de ácido sólo permite disolver el ZnO, quedando las ferritas formadas en la tostación intactas. Mediante la utilización de espesadores se separan los sólidos no disueltos de la disolución de sulfato de zinc, que pasan a la siguiente etapa de lixiviación ácida.

Para mejorar la recuperación del zinc y evitar así pérdidas de metal se efectúa la lixiviación ácida en caliente (90-95°C) durante 2-4 horas. Bajo estas condiciones se disuelve el zinc y el hierro asociado a la ferrita de zinc, obteniéndose una solución rica en zinc que contiene entre 15-30 g/l de hierro que será posteriormente eliminado de la misma mediante la precipitación jarosítica.

La jarosita es un compuesto sintético cristalino cuya fórmula es M₂Fe₆(SO₄)₄(OH)₁₂ en donde M puede ser Pb, Na, K, NH₄⁺. Se consigue añadiendo NH₄⁺ o Na⁺ a la disolución proveniente de la lixiviación ácida, ajustando el pH a 1.5 y fijando una temperatura de unos 90°C. El resto del hierro se puede precipitar a pH 3.5 por neutralización.

Con este método se puede permitir la lixiviación de más hierro, a la vez que se recupera el zinc de las ferritas aumentando, así, la recuperación de zinc del mineral.



Reacción de formación de jarosita

El control de PH se realiza por adición de óxido de zinc a la disolución. La ventaja de la jarosita es que se puede separar fácilmente de la disolución. Una vez precipitada la jarosita en decantadores, se filtra en los filtros banda y se extrae como residuo, depositándose en lugares acondicionados para ello.

El hierro residual de esta precipitación jarosítica, que suele quedar en forma ferrosa, bien se reoxida y neutraliza aparte para su eliminación o bien se envía a la lixiviación neutra.

Tras la lixiviación se efectúa una purificación de la disolución con objeto de eliminar algunos elementos presentes en la misma. La purificación se realiza en dos etapas y se eliminan metales disueltos como el cobre, el cadmio o el cobalto, que se recuperan como subproductos. Dicha eliminación se realiza con la adición de zinc en polvo, lo que es posible debido a la cementación de los mencionados metales por el zinc, que es menos noble que ellos.

Una vez obtenida la disolución purificada, esta pasa a las cubas de electrólisis, que son rectangulares, de hormigón y recubiertas de plomo o PVC, constituidas por ánodos de plomo aleado con algo de plata (1%) para reducir la corrosión del zinc con plomo y cátodos de aluminio.

En esta fase del proceso, se produce el paso de una corriente eléctrica a través de la disolución, originándose el zinc metálico puro, que se deposita sobre el cátodo en forma de láminas.

Las reacciones que se producen en el proceso de electrolisis son las siguientes:



En esta fase de electrolisis la planta consume una gran parte de la energía eléctrica para la producción del Zn.

Es preciso fundir el zinc que se ha adherido a los cátodos tras la electrolisis, por lo que tiene lugar una etapa de fusión del zinc.

Las láminas de zinc producidas por electrólisis pasan a la planta de fusión y aleaciones, donde son fundidas en hornos eléctricos de inducción de baja frecuencia. Una vez fundido el zinc, se envía a las máquinas de colada con el objeto de producir las diversas formas comerciales que requiere el mercado, lingotes, polvo, etc.

Esta fase de fusión junto con la de electrolisis tiene una gran demanda de energía eléctrica.

Las falsas entradas de aire en los hornos puede provocar la formación de grasos u óxidos de zinc y espumas (2-2.5%), que en forma de sólidos permanecen flotando sobre el zinc fundido. Para favorecer la separación de ambas fases se adiciona cloruro amónico.

Los óxidos, grasos y espumas producidos son tratados para su recuperación en forma de tochos de zinc que son refundidos en un horno basculante de inducción. El flujo de zinc se hace pasar por una fuerte corriente de aire, atomizado el zinc líquido, siendo recogido en unas cámaras de decantación. El polvo de zinc así producido es utilizado como agente cementante en la fase de purificación tras la lixiviación.

Los principales productos finales del proceso son lingotes de zinc puro, óxido de zinc, aleaciones de base zinc, ácido sulfúrico y cementos de cobre.



Figura 27: Paquetes de Zinc de 1000 Kg. Calidad 99.995%

Fuente: [15]

4.2.3. Consumo de energía eléctrica en la producción de zinc

En estas industrias, tras estudiar el proceso de producción se puede decir que aunque todo el proceso supone consumo de electricidad, la mayor parte de este consumo se debe a la electrolisis a la que se somete a la disolución de óxido de zinc en ácido sulfúrico, y a la fusión del zinc obtenido en hornos eléctricos para su posterior transformación en las formas comerciales requeridas.

Las gráficas siguientes muestran los patrones de consumo de energía eléctrica diario y semanal de una planta metalúrgica de zinc en valores unitarios. Se observa que es un consumo plano todo el tiempo.

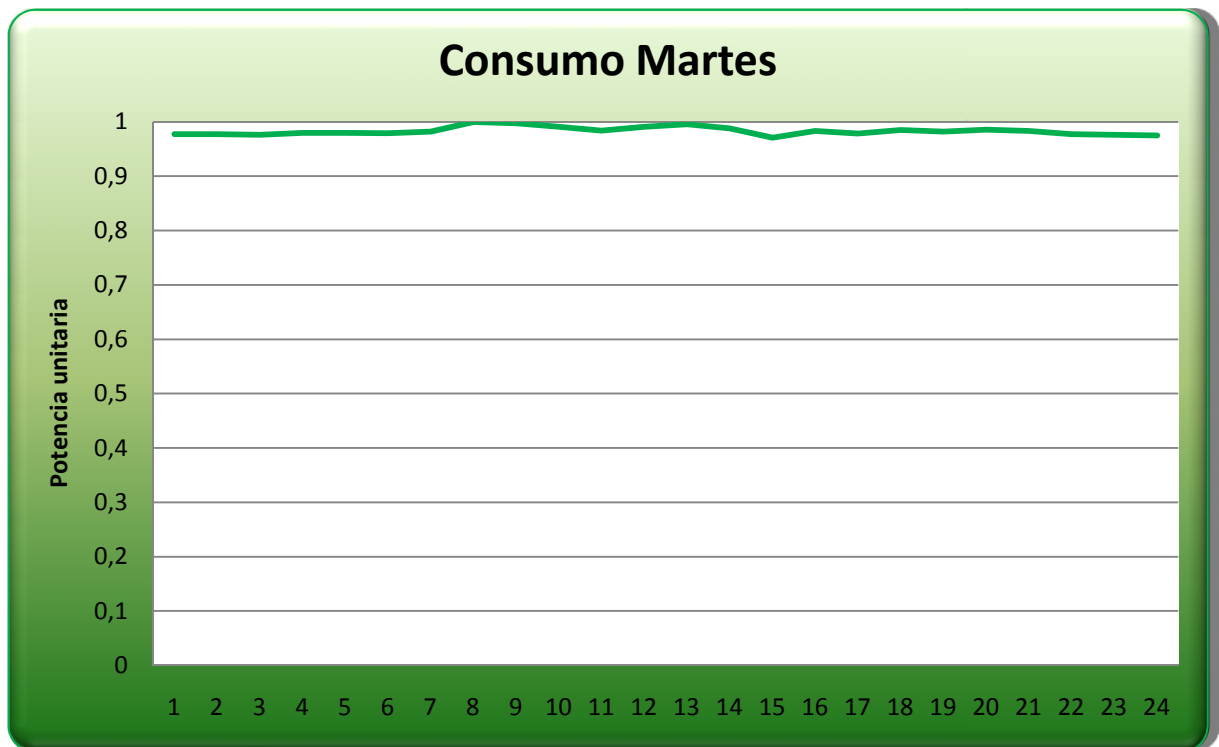


Figura 28: Patrón de consumo eléctrico diario de planta de zinc

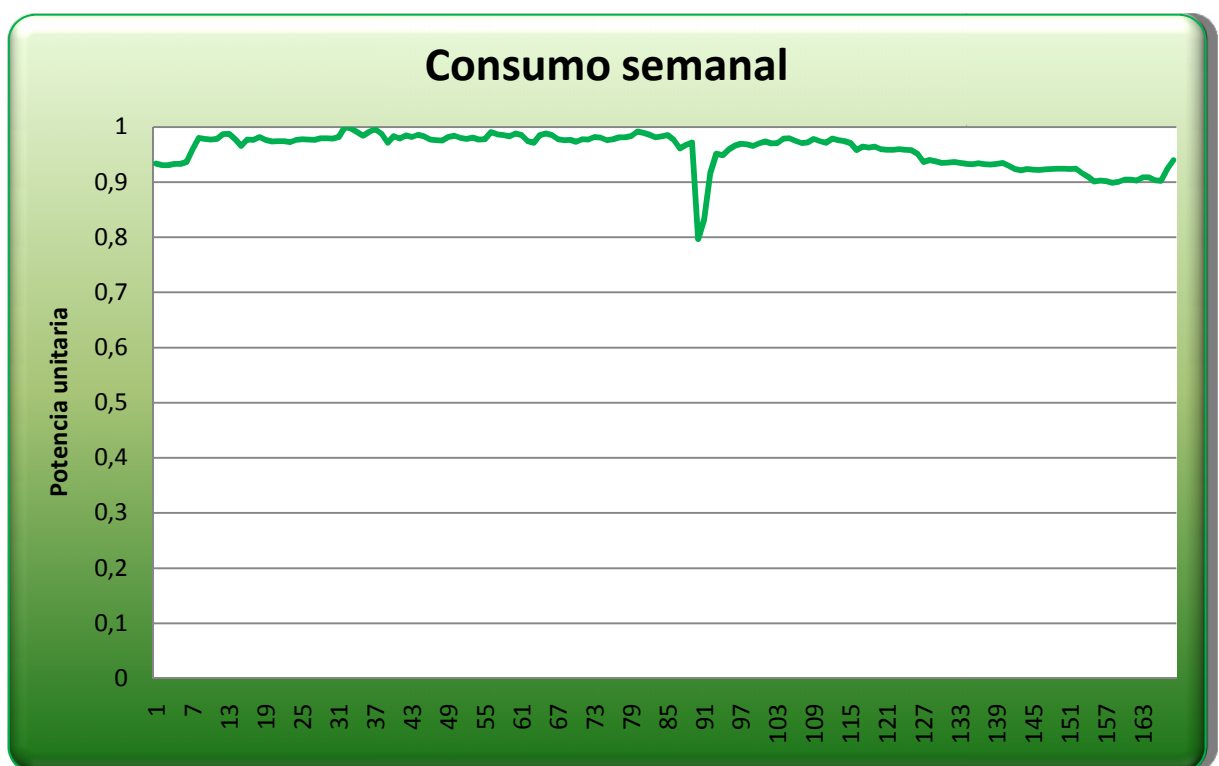


Figura 29: Patrón de consumo eléctrico semanal de planta de zinc

4.3. La Industria de la obtención de gases Industriales

El aire está formado principalmente por Oxígeno, Nitrógeno, y una proporción muy pequeña de gases nobles como son Argón, Kriptón, Xenón, Neón...

Cada uno de estos gases tiene mucha utilidad en la industria, por lo que es necesario separarlos y acondicionarlos para poder ser utilizados, esta tecnología se denomina fraccionamiento del aire.

El fraccionamiento del aire en los gases que lo componen no es tarea fácil, y requiere el uso de técnicas muy avanzadas y de un elevado consumo de energía.

Es importante saber que los gases obtenidos, tras su aplicación se devuelven a la atmósfera sin ningún tipo de problema para esta ni para la salud de las personas, ya que no se producen cambios significativos en la concentración de nitrógeno u oxígeno.



Figura 30: Planta de fraccionamiento de aire de Messer en el Morell

Fuente: [19]

Las plantas de fraccionamiento de aire suministran frecuentemente a industrias que consumen grandes volúmenes de los citados gases, como pueden ser hospitales, siderúrgicas, refinerías, etc. En España destacan Messer Ibérica de Gases S.A. Praxair España S.L. o Air Liquide España S.A. como empresas de obtención de gases industriales.

La industria de la Siderurgia es una de las que más Oxígeno puro demanda. El Nitrógeno se utiliza sobre todo como gas para refrigeración.

A continuación se hace un análisis más detallado de las características y aplicaciones de estos gases.

- Oxígeno

El oxígeno es el elemento más abundante de la corteza: 50,3% en peso. En la atmósfera constituye el 21% en volumen.

La principal fuente de extracción de oxígeno es por fraccionamiento del aire (99%) o por electrolisis del agua (1%).

El oxígeno es indispensable para casi todas las formas de vida en la Tierra. Alrededor de 2/3 del cuerpo humano y 9/10 del agua es oxígeno, pero además resulta muy útil en muchas otras aplicaciones industriales.

La mayor parte del consumo industrial de oxígeno se produce en los hornos de obtención de acero por soplado de oxígeno. Otros consumidores importantes son las industrias consumidoras de gas de síntesis ($\text{CO} + \text{H}_2$): amoníaco (nitrógeno) y metanol, síntesis de óxido de etileno y soldadura oxiacetilénica.

También se utiliza en el blanqueo de papel y para potenciar el rendimiento de las depuradoras de aguas residuales y de las piscifactorías.



Figura 31: Esquema de un convertidor de acero con inyectado de Oxígeno

Fuente: [24]



Se encuentra en la atmósfera en estado gas. Es incoloro, inodoro e insípido.

Reacciona con todos los elementos, excepto gases inertes, para formar compuestos llamados óxidos. Unos elementos reaccionan mejor que otros, debido a que el número de oxidación varía. Por ejemplo, el magnesio se oxida muy rápido, reaccionando espontáneamente en el aire. No obstante, los metales nobles, como el oro y el platino, se oxidan sólo a muy altas temperaturas.

Permite la combustión y ayuda a todos los materiales que son inflamables en aire a quemarse de forma más rápida y vigorosa.

Masa atómica	15,9994 g/mol
Densidad	1.429 Kg/m ³
Punto de ebullición	-183°C
Punto de fusión	-218,8°C

Tabla 7: Principales propiedades físicas del Oxígeno

Fuente: [21]

- **Nitrógeno**

El aire está constituido en un 79% por Nitrógeno. Además de en el aire, el nitrógeno se encuentra en todas las formas de vida, en algunos depósitos naturales de hidrocarburos gaseosos y en muchos compuestos orgánicos e inorgánicos.

Es un gas muy útil en aplicaciones de la industria electrónica, petroquímica, farmacéutica, tratamiento térmico de metales, la conservación de alimentos y en la limpieza de tuberías entre otras. En forma líquida se utiliza para congelar alimentos y en los hospitales para la conservación de material biológico y en criocirugía.

Hay varios métodos para extraer Nitrógeno puro. Uno de ellos es a partir del aire en una torre de fraccionamiento, que es el proceso que se estudiará a continuación.

Es un gas incoloro, inodoro, insípido y no tóxico, y existe como gas no inflamable a temperatura y presión atmosférica. Una densidad relativa de 0.9669 hace que el nitrógeno sea más ligero que el aire. Es además ligeramente soluble en agua, y otros muchos líquidos, y es un conductor pobre de calor y electricidad.



Masa atómica	14,0067 g/mol
Densidad	0,81 g/ml
Punto de ebullición	-195,79 °C
Punto de fusión	-218,8 °C

Tabla 8: Principales propiedades del Nitrógeno

Fuente: [22]

- Argón

El Argón constituye aproximadamente el 0,93% de la atmósfera. Forma parte del grupo de los gases nobles. Estos poseen una gran estabilidad y unos ratios de reacción extremadamente bajos. También son llamados gases inertes.

El argón se emplea en industrias y aplicaciones como acerías, aislamiento de ventanas, electrónica/semiconductores, industria aeroespacial, lámparas, láser, metalurgia, soldadura, etc.

El Argón es incoloro, inodoro, insípido y no tóxico. Es un 25% más pesado que el aire. A presión atmosférica, se hace líquido a -186°C. No es corrosivo, ni inflamable y tiene una baja conductividad termal y baja solubilidad en agua.

Masa atómica	39,948 g/mol
Densidad	1,40 g/ml
Punto de ebullición	-185,8 °C
Punto de fusión	-189,4 °C

Tabla 9: Principales propiedades del Argón

Fuente [23]

- Kriptón/Xenón y Neón

Se encuentran en la atmósfera en proporciones muy reducidas, se obtienen en el proceso de fragmentación del aire.

Son gases inertes, incoloros, inodoros y no inflamables.

Al emitir una luz de color cuando son sometidos a una carga eléctrica, son utilizados en lámparas, láser y sistemas de imágenes médicas.

Entre las distintas aplicaciones de estos gases, se encuentran la investigación, láser, lámparas e instrumentación en Industria Nuclear.

Actualmente una aplicación común del gas xenón es el alumbrado de los vehículos automóviles.



Figura 32: Faro de gas xenón en automóvil

Fuente: [25]

4.3.1. Proceso de fraccionamiento del aire

La materia prima para una planta de fraccionamiento de aire es el propio aire. Los gases que lo componen y que pueden extraerse en forma pura son el oxígeno, nitrógeno, argón y otros gases nobles. Estos gases se usan en una gran cantidad de procesos industriales.

El aire es aspirado en la planta y fuertemente comprimido. Este se refrigera en intercambiadores de calor hasta la licuación, a una temperatura que ronda los -196°C .

Aprovechando la diferencia de temperaturas de evaporación de los gases que conforman el aire, es posible separarlos en columnas para obtenerlos en su forma pura y almacenarlos para su utilización en la industria que lo requiera.

El diagrama de flujo de una planta de fraccionamiento de aire es el que se ilustra en la figura 33:

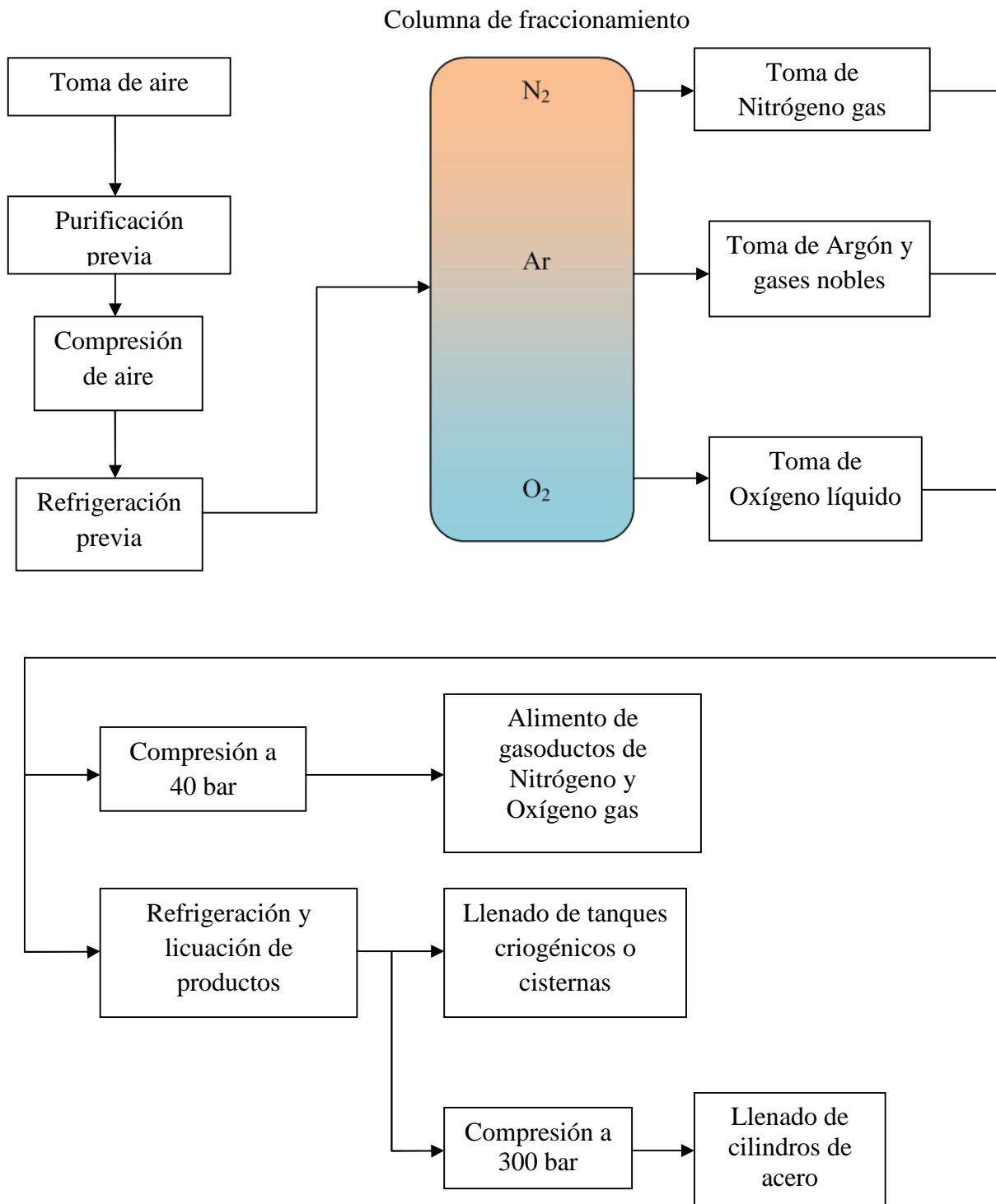


Figura 33: Diagrama de flujo de fraccionamiento del aire



4.3.2. Fases en la planta de fraccionamiento de aire

1) Toma del aire:

El aire se aspira en la planta. El 99% de la mezcla aspirada es Nitrógeno y Oxígeno. El 1% restante se debe a Argón (prácticamente la totalidad del 1%) dióxido de carbono, Helio, Neón, Xenón y Kriptón.

2) Purificación previa:

Se hace un filtrado del aire para eliminar las impurezas que lo puedan contaminar, principalmente dióxido de carbono, vapor de agua, partículas sólidas, etc.

3) Compresión:

El aire libre de impurezas se comprime hasta una presión aproximada de 6 bar.

4) Refrigeración previa:

El aire comprimido es refrigerado previamente a -180°C . Al entrar en la columna separadora el aire se expande, por lo que continúa refrigerándose y se licua parcialmente.

5) Fraccionamiento:

El Oxígeno tiene un punto de ebullición de -183°C , y el Nitrógeno de -196°C . El líquido baja por la columna, mientras el gas asciende. Del líquido se evapora el Nitrógeno con menor punto de ebullición. Y el Oxígeno se licua. Así se obtiene Oxígeno en la parte de debajo de la columna y Nitrógeno en la cabeza.

6) Toma de Argón y gases Nobles:

En mitad de la columna, y debido a los distintos puntos de ebullición, se separa una mezcla mayoritariamente de Argón, que puede seguir fraccionándose en los demás gases nobles que contiene el aire.

Este proceso solo se justifica en plantas muy grandes, ya que la concentración de estos gases, por ejemplo el Xenón, es tan pequeña que se necesitan 10.000.000 metros cúbicos de aire para obtener solamente un metro cúbico de Xenón puro.

7) Compresión:

El Oxígeno y Nitrógeno producidos alimentan gasoductos para grandes industrias, por ejemplo la del acero, a una presión aproximada de 40 bar.

8) Llenado de depósitos:

Los gases obtenidos se licuan para ser introducidos en tanques criogénicos, cisternas, o comprimidos a 300 bar y almacenados en tanques de acero.



Figura34: Planta fraccionamiento de aire de Messer en Hungría

Fuente: [19]

4.3.3. Consumo de Energía en el fraccionamiento de aire

Una vez estudiado el proceso de producción, se observa que prácticamente en todas las fases es necesario un consumo de energía eléctrica, sin embargo la mayor parte de esta energía es demandada por los procesos de compresión, refrigeración de los gases y acondicionamiento para la alimentación de gasoductos o llenado de tanques, cilindros y cisternas.

El consumo en estas industrias es modular, consumiendo ligeramente más en los periodos valle y en fines de semana, cuando la electricidad es barata. La posibilidad de almacenar el producto final en tanques hace que su carácter de modulación sea aprovechado en la gestión del proceso industrial, optimizando el coste energético.

Las siguientes gráficas muestran el patrón de consumo eléctrico diario y semanal en el sector estudiado en valores unitarios. Si bien estas gráficas no muestran una modulación excesiva de sus consumos, como consecuencia de una alta demanda de su producción en el momento de obtención de las gráficas, que requiere que la planta esté trabajando prácticamente a plena carga las 24 h del día.

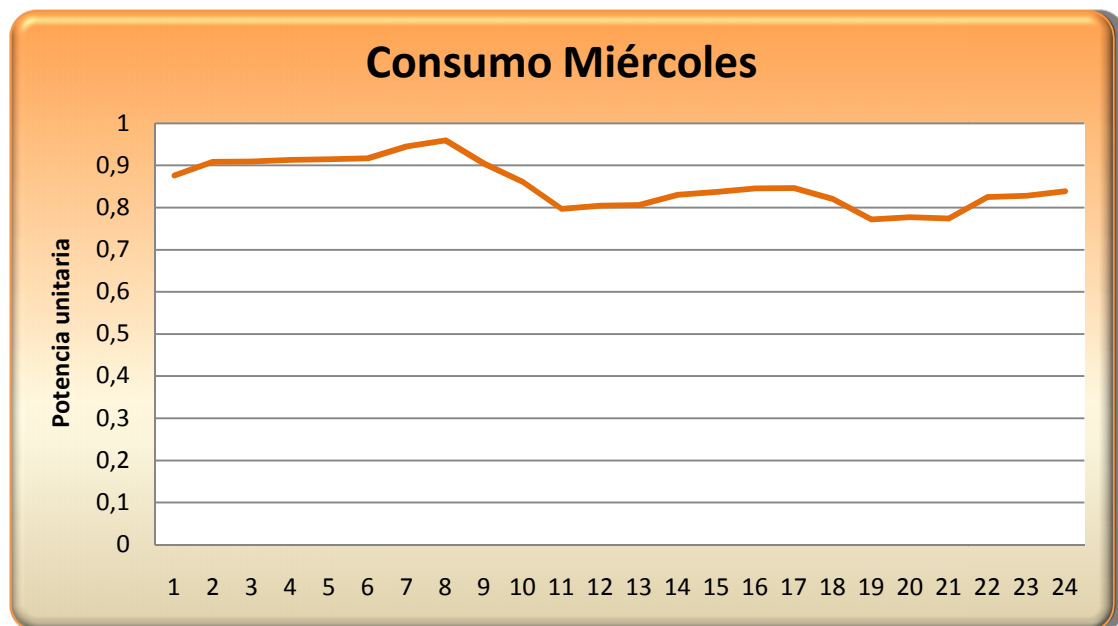


Figura 35: Patrón de consumo eléctrico diario de industria de fraccionamiento de aire

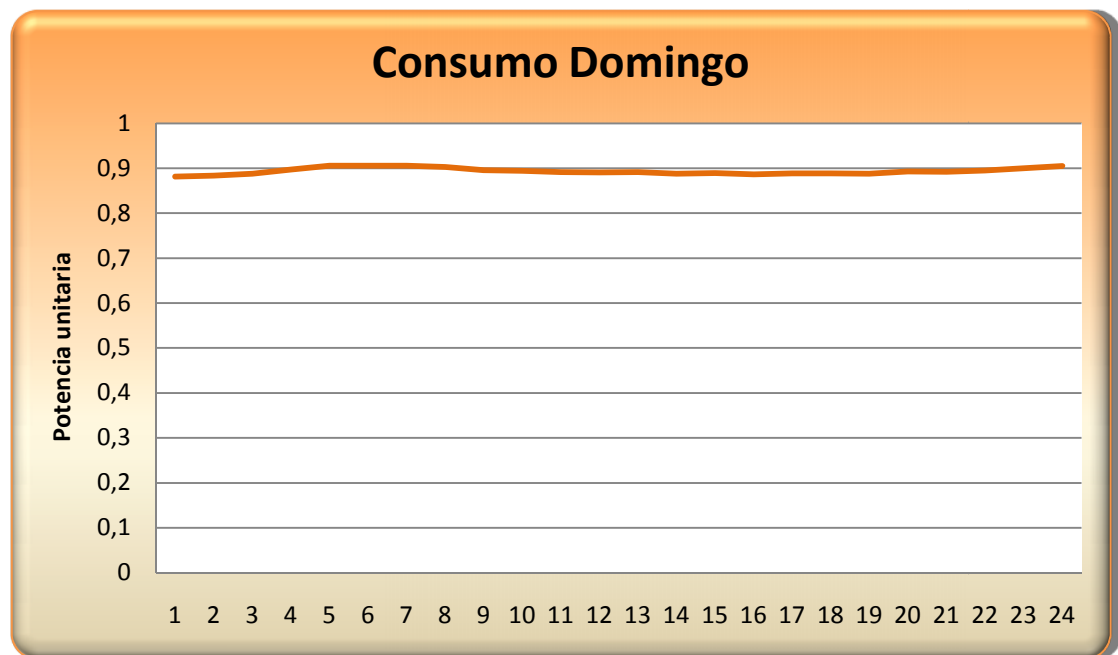


Figura 36: Patrón de consumo eléctrico en Domingo de industria de fraccionamiento de aire

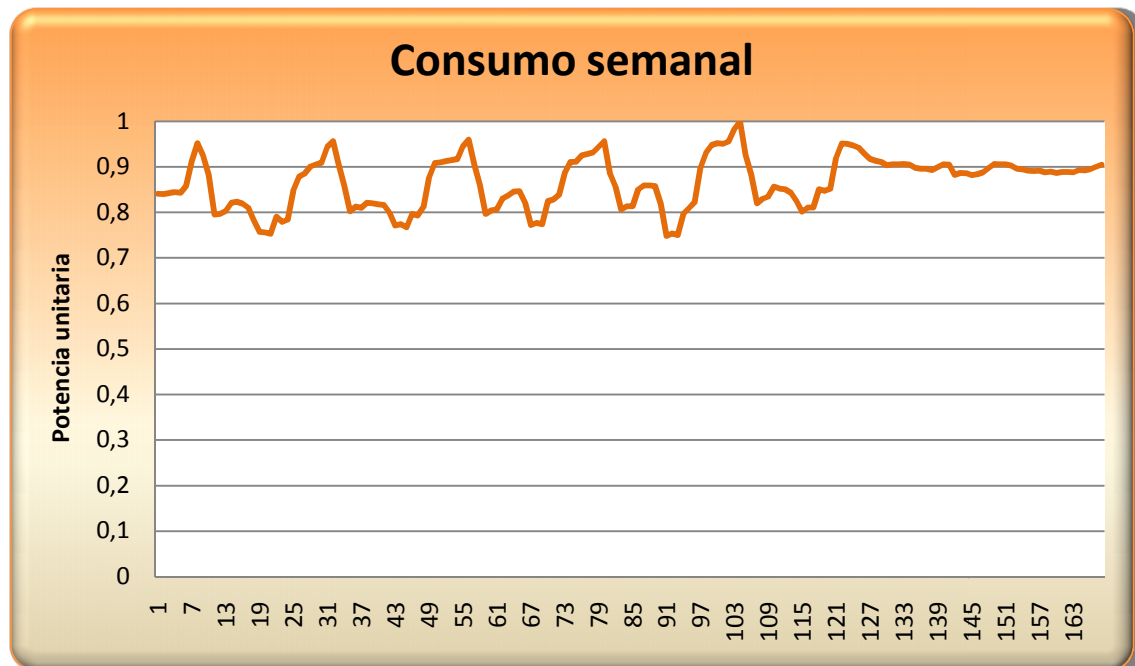


Figura 37: Patrón de consumo eléctrico semanal de industria de fraccionamiento de aire

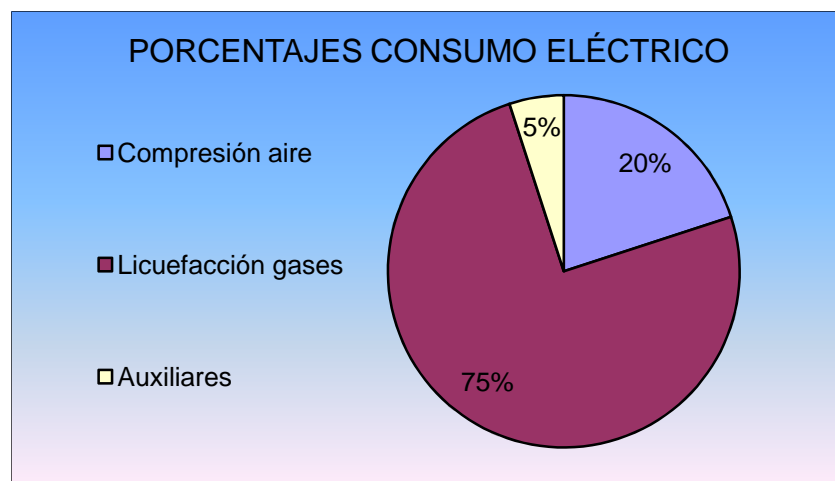


Figura 38: Porcentaje de consumo eléctrico por procesos en el fraccionamiento del aire

Las industrias de gases industriales tienen por regla general un consumo modular, en el que los picos se dan en horas valle, y los fines de semana es prácticamente constante durante todo el día.

Capítulo 5

Herramienta informática de simulación

Este apartado trata del desarrollo de la aplicación informática para simular la curva de demanda que tendrían las industrias estudiadas por separado y en su conjunto.

5.1. Estructura de la herramienta

La aplicación se ha desarrollado en Excel habilitado para Macros. Se trata de un libro con 7 hojas: *Entrada de datos*, *Cálculo de valores*, *Serie de datos resultados*, *Siderurgia*, *Metal*, *Gas* y *Demanda agregada*, cuyas funciones se explican a continuación.

- Entrada de datos

En esta primera hoja se han creado 3 tablas para introducir los datos de las plantas cuya demanda eléctrica se pretende simular. Cada tabla corresponde a un sector industrial: siderurgia no integral, metalurgia no férrea (zinc) y gases industriales.

Para cada sector hay 2 columnas en las que se pueden introducir el número de plantas que se simulan y su Potencia nominal en MW. Por poner un ejemplo, se podría simular la demanda que tendrían 2 siderúrgicas de 100 MW, una de 90 MW, 3 metalúrgicas de 50 MW y 4 productoras de gases de 10 MW.

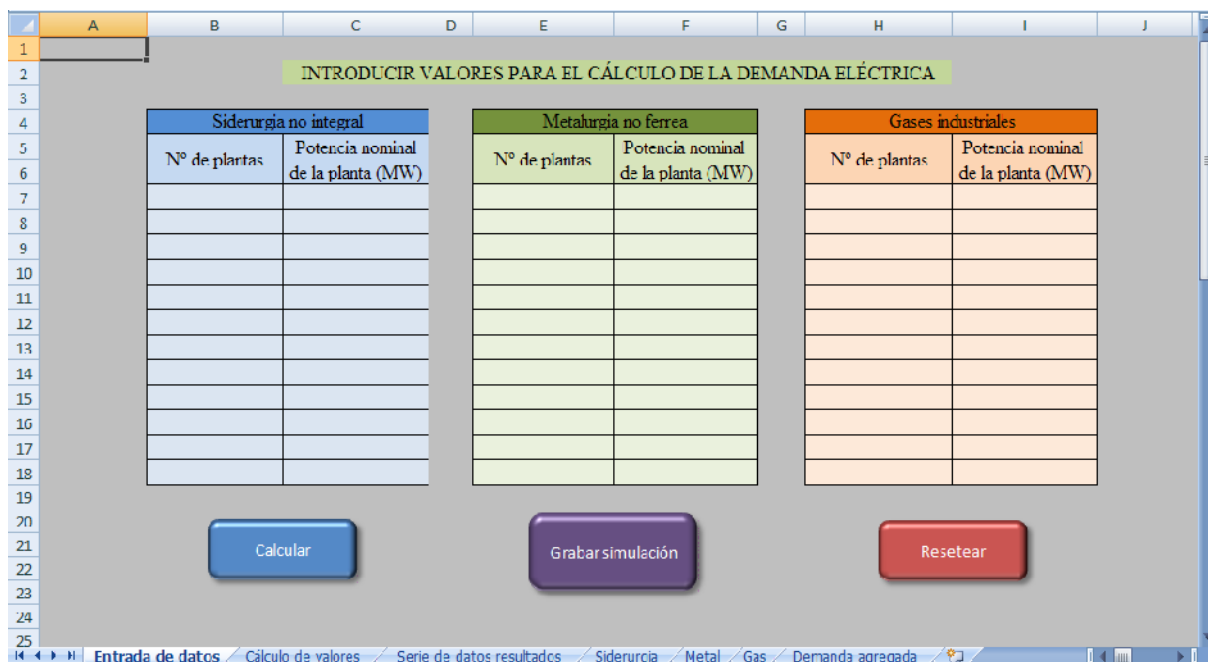


Figura 39: Hoja de introducción de datos de la aplicación de simulación

Se han creado 3 botones para manejar el programa; *Calcular*, *Grabar simulación* y *Resetear*. La explicación de cada una de las funciones es la siguiente:

Calcular: Calcula automáticamente todos los campos del libro necesarios para dibujar las gráficas de demanda de electricidad.

Grabar simulación: Genera un archivo en Excel que contiene todos los datos resultados y las gráficas de la simulación, lo guarda en la carpeta donde está contenida la herramienta informática, y lo nombra con la fecha y la hora a la que se ha generado la simulación.

Resetear: Limpia todos los campos de la tabla inicial y resetea a cero todos los resultados de la simulación anterior.

Estas 3 funciones se han creado generando Macros programadas en VB y asignándoles a los botones dichas Macros.

- Cálculo de valores

En esta hoja está la información básica con la que funciona el programa.

Aquí se encuentran 3 columnas que contienen los patrones de consumo eléctrico de los sectores, una columna por cada sector. Cada dato representa un consumo eléctrico en p.u. para una hora (de 1 a 24) y un día de la semana (de lunes a viernes).

A esta hoja se copian los datos introducidos en la anterior en otras 3 columnas, de forma que se multiplican el nº de plantas introducido por la potencia de cada planta para cada uno de los 3 sectores. Después se suman estas potencias, y como resultado se obtiene la potencia total máxima de cada sector.

Para ilustrar lo que ocurre, se continúa con el ejemplo anterior.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Día	hora	Siderurgia	Metalurgia	Gases		producto nPlantas*P	multiplicador siderurgia	producto nPlantas*P	multiplicador meta	producto nPlantas*P	multiplicador gas	
2	L	1	0,771439028	0,933373967	0,840811185		200,0	290,0	150,0	150,0	40,0	40,0	
3	L	2	0,712965022	0,930780665	0,840223288		90,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
4	L	3	0,740278361	0,930508383	0,842264645		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
5	L	4	0,72663666	0,932640506	0,844201023		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
6	L	5	0,735983274	0,935158883	0,842826335		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
7	L	6	0,708181115	0,936783835	0,857866407		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
8	L	7	0,779277524	0,93974761	0,912442183		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
9	L	8	0,718533994	0,980036206	0,952113399		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
10	L	9	0,648415211	0,978477026	0,925471622		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
11	L	10	0,584798079	0,97699961	0,881874427		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
12	L	11	0,527549255	0,976515252	0,795231358		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
13	L	12	0,523680328	0,967231767	0,79673736		0,0	290,0	0,0	150,0	0,0	40,0	
14	L	13	0,554637065	0,967834712	0,803033671			290,0		150,0		40,0	
15	L	14	0,517977839	0,977788807	0,821289896			290,0		150,0		40,0	
16	L	15	0,499351351	0,965518082	0,823442456			290,0		150,0		40,0	
17	L	16	0,516418262	0,976618407	0,819131268			290,0		150,0		40,0	
18	L	17	0,563420846	0,976300006	0,810128316			290,0		150,0		40,0	
19	L	18	0,549412433	0,981756	0,782800409			290,0		150,0		40,0	
20	L	19	0,512463688	0,976492991	0,757111178			290,0		150,0		40,0	
21	L	20	0,509047903	0,973507006	0,755730542			290,0		150,0		40,0	
22	L	21	0,517008524	0,974717794	0,757699055			290,0		150,0		40,0	
23	L	22	0,577095858	0,974076706	0,789950095			290,0		150,0		40,0	
24	L	23	0,644651606	0,972262107	0,77932916			290,0		150,0		40,0	
25	L	24	0,751480352	0,976815784	0,784204236			290,0		150,0		40,0	
26	M	1	0,738159612	0,977667731	0,848627005			290,0		150,0		40,0	
27	M	2	0,777864817	0,9777139124	0,878610683			290,0		150,0		40,0	
28	M	3	0,781332473	0,976551091	0,880192823			290,0		150,0		40,0	

Figura 40: Hoja de cálculo de valores de la aplicación de simulación

- Serie de datos resultados

Una vez obtenida la potencia máxima que va a consumir cada sector, se utiliza como base para los patrones de las industrias en p.u. Así en el ejemplo seguido, se tendrían 290 MW de potencia base para la siderurgia no integral, 150 MW de base para la metalurgia no férrea y 40 MW de base para los gases industriales. Se multiplican los patrones horarios por sus respectivas bases y así se obtienen 3 columnas con la demanda resultado. Si además se suman las 3 columnas queda una 4ª, que sería la demanda agregada de los 3 sectores. Las 4 columnas se encuentran en la hoja de serie de datos resultados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
3	Día	Hora		Siderurgia	Metalurgia	Gases		Demanda Agregada	
4	L	1		223,7	140,0	33,6		397,4	
5	L	2		206,8	139,6	33,6		380,0	
6	L	3		214,7	139,6	33,7		387,9	
7	L	4		210,7	139,9	33,8		384,4	
8	L	5		213,4	140,0	33,7		387,1	
9	L	6		205,4	140,5	34,3		380,2	
10	L	7		226,0	143,9	36,5		406,4	
11	L	8		208,4	147,0	38,1		393,5	
12	L	9		188,0	146,8	37,0		371,8	
13	L	10		169,6	146,5	35,3		351,4	
14	L	11		153,0	146,8	31,8		331,6	
15	L	12		151,9	148,1	31,9		331,8	
16	L	13		160,8	148,2	32,1		341,1	
17	L	14		150,2	146,7	32,9		329,7	
18	L	15		144,8	144,8	32,9		322,5	
19	L	16		149,8	146,5	32,8		329,1	
20	L	17		163,4	146,4	32,4		342,2	
21	L	18		159,3	147,3	31,3		337,9	
22	L	19		148,6	146,5	30,3		325,4	
23	L	20		147,6	146,1	30,2		323,9	
24	L	21		148,5	146,1	30,1		324,7	
25	L	22		167,4	146,1	31,6		345,1	
26	L	23		186,9	145,8	31,2		364,0	
27	L	24		217,9	146,5	31,4		395,8	
28	M	1		214,1	146,7	33,9		394,7	

Figura 41: Hoja de serie de datos resultados de la aplicación de simulación

De esta hoja se escogen los datos para elaborar las gráficas de demanda de electricidad semanal y diaria en cada sector, además de la demanda agregada. En las hojas siguientes, *siderurgia*, *metal* y *gas*, se muestran las citadas gráficas y además la energía total consumida diaria, semanal y anual, que se ha calculado como la suma de las potencias consumidas en el día, semana y año respectivamente.

Para el correcto funcionamiento de la herramienta es muy importante tener información fiable del consumo eléctrico de los distintos procesos.

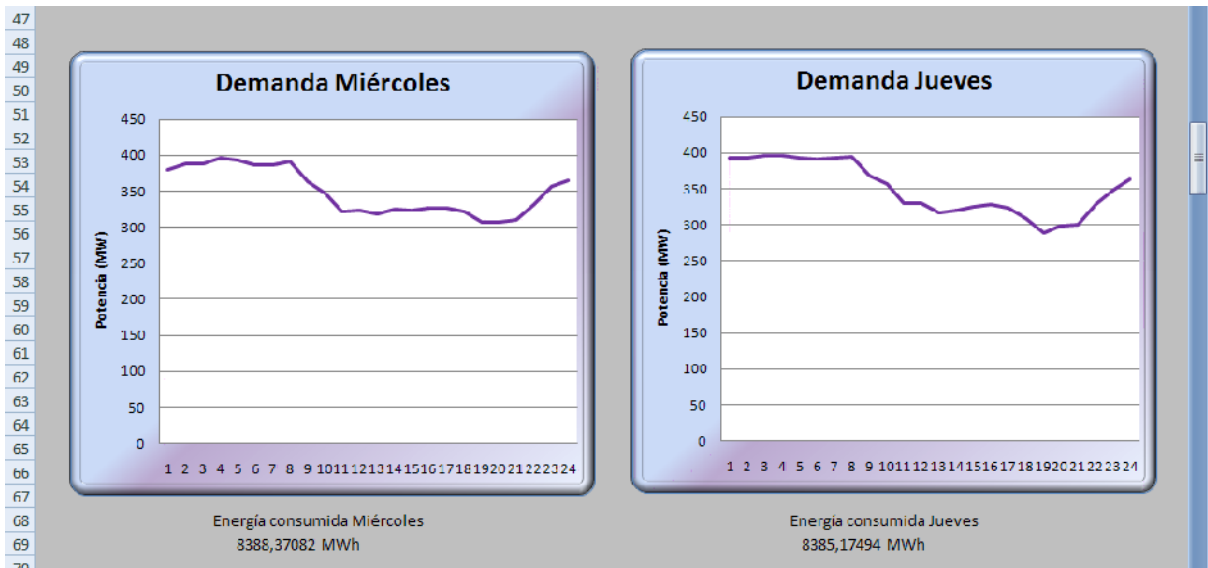


Figura 42: Ejemplo de Demanda agregada y energía consumida en miércoles y jueves del ejemplo propuesto

Los cálculos y las operaciones anteriores se realizan de forma automática. El usuario solo debe introducir las características (número y Potencia nominal) de las plantas de las que se quiera simular el consumo en la hoja de entrada de datos, pulsar el botón calcular y de ahí pasar a las hojas que contienen las gráficas de demanda y el consumo de energía ya calculados, donde se podrán consultar. Las simulaciones se pueden guardar pulsando el botón Guardar simulación. Se puede limpiar y resetear todo el libro pulsando el botón Resetear. Lo que dejará la aplicación lista para realizar una nueva simulación.

5.2. Simulación de casos

La herramienta se ha aplicado para resolver varios casos de estudio. En este apartado se presenta el resultado de una simulación realista para un caso de estudio en el que se tienen en funcionamiento las siguientes industrias:

- Sector de siderurgia no integral
1 planta de 100 MW y 2 de 90 MW.
- Sector de metalurgia no férrea
1 planta de 50 MW y 2 de 60 MW.
- Sector de extracción de gases
3 plantas de 10 MW.

Primero se analizarán los casos por tecnologías, y se analizará la demanda agregada total, horas valle y punta, consumo de energía, comportamiento diario, etc. Para simplificar, solo se incluirán en este trabajo las demandas de un día entre diario, en fin de semana y la demanda semanal, aunque la herramienta calcula el consumo de todos los días de la semana.

a) Demanda del caso simulado en el sector de siderurgia no integral

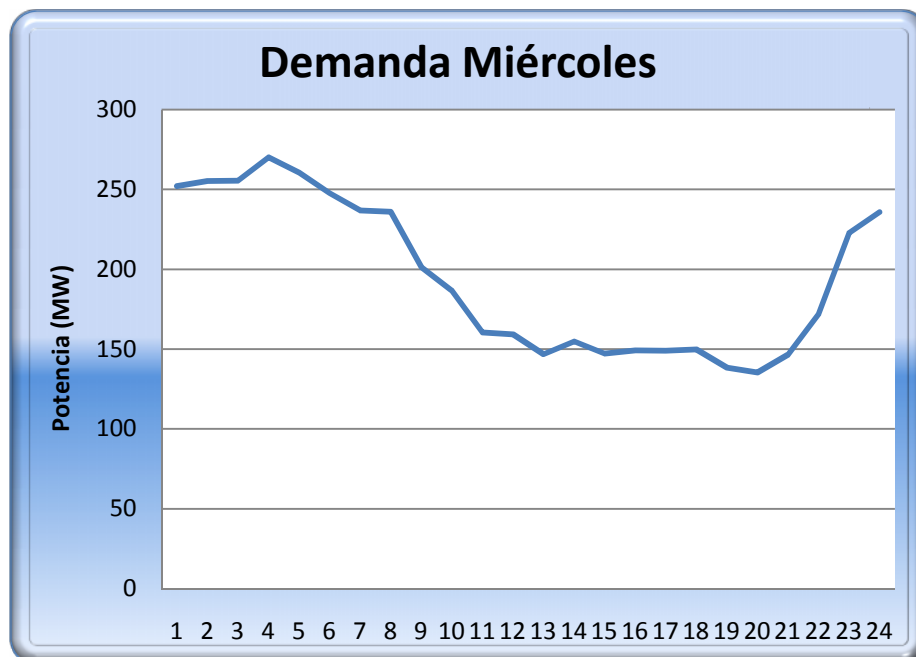


Figura 43: Consumo eléctrico en miércoles del sector siderúrgico

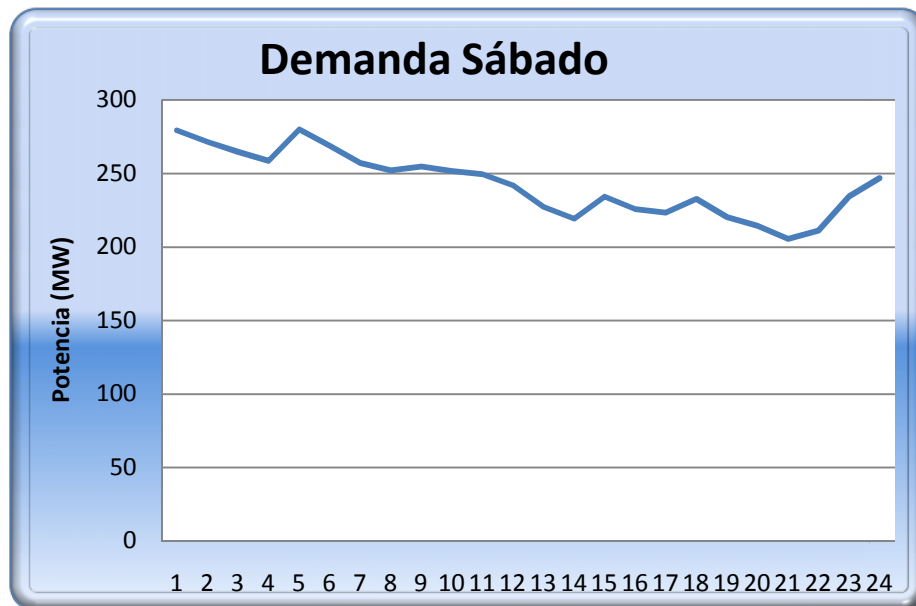


Figura 44: Consumo eléctrico en sábado del sector siderúrgico

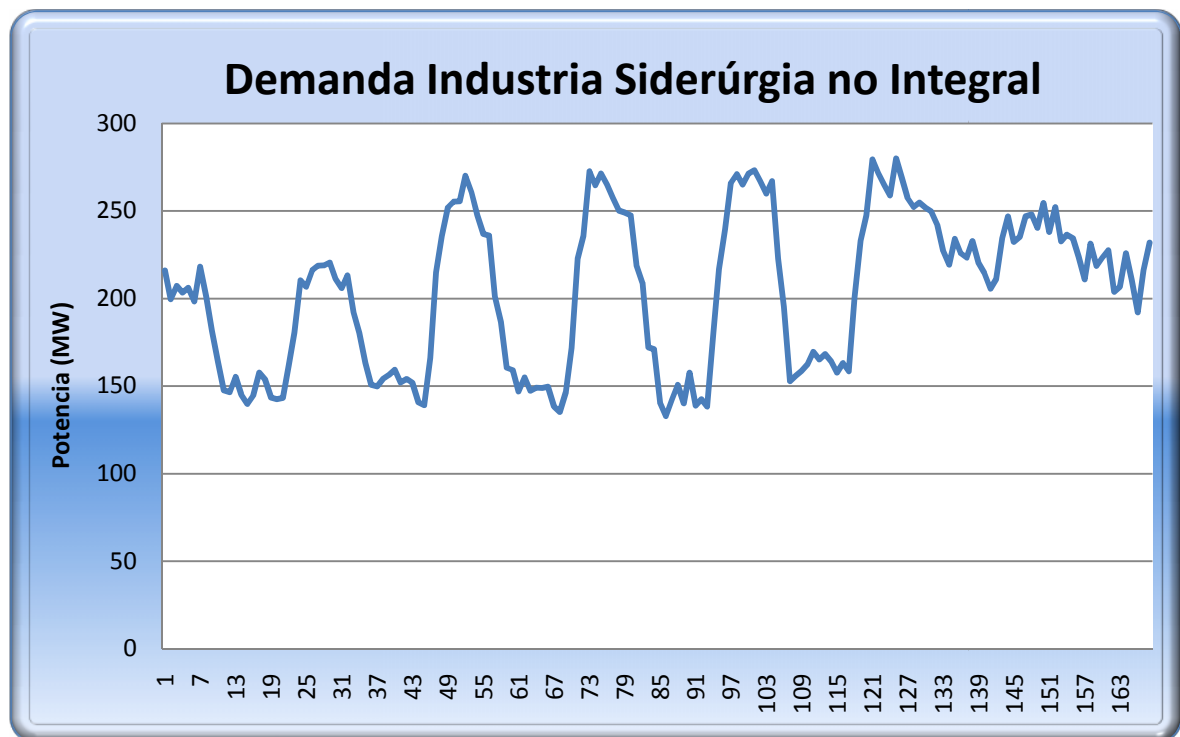


Figura 45: Consumo eléctrico semanal del sector siderúrgico

En esta simulación, se observa la demanda eléctrica de 1 planta siderúrgica de 100 MW y 2 plantas de 90 MW.

De la gráfica de demanda semanal se observa que el consumo máximo son en torno a 280 MW. Los picos de consumo se alcanza en las noches (ver gráfica 17), coincidiendo con las horas valle de la demanda eléctrica nacional. Los valles de esta simulación se sitúan aproximadamente en los 150 MW. Estos valles se producen por el día, justo en las horas pico de la demanda eléctrica nacional. En los fines de semana el consumo se mantiene aproximadamente constante, entre los 200 y 250 MW.

En cuanto al consumo de energético, la energía consumida el miércoles es de 4669,2 MWh, el consumo en sábado es de 5827,2 MWh, el consumo de una semana es de 34295,8 MWh, y el consumo anual es de 1783,4 GWh.

b) Demanda del caso simulado en el sector de metalurgia no férrea (zinc)

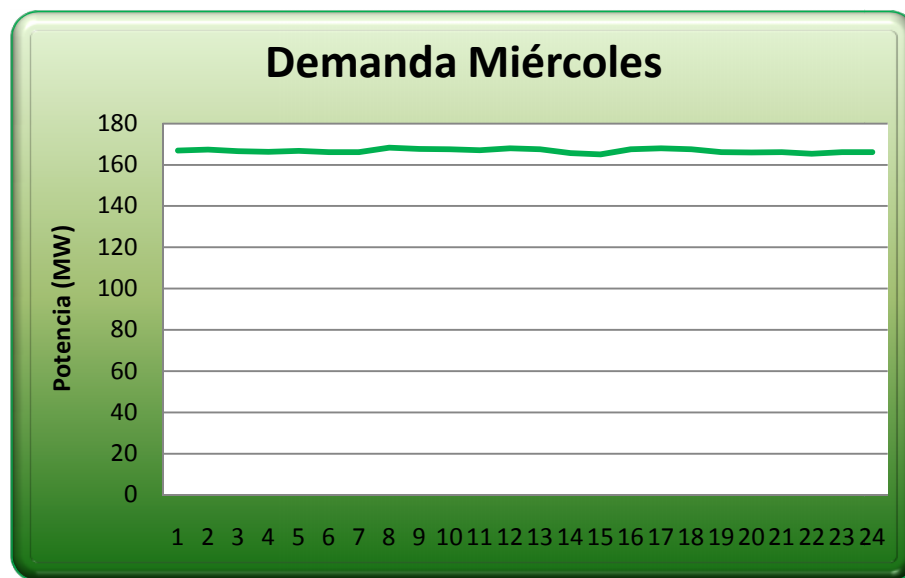


Figura 46: Consumo eléctrico en miércoles del sector de metalurgia no férrea

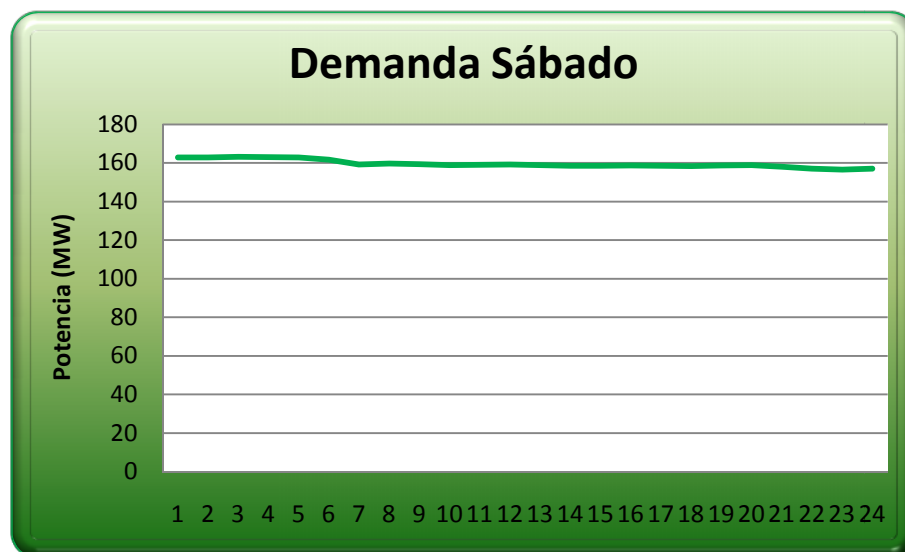


Figura 47: Consumo eléctrico en sábado del sector de metalurgia no férrea

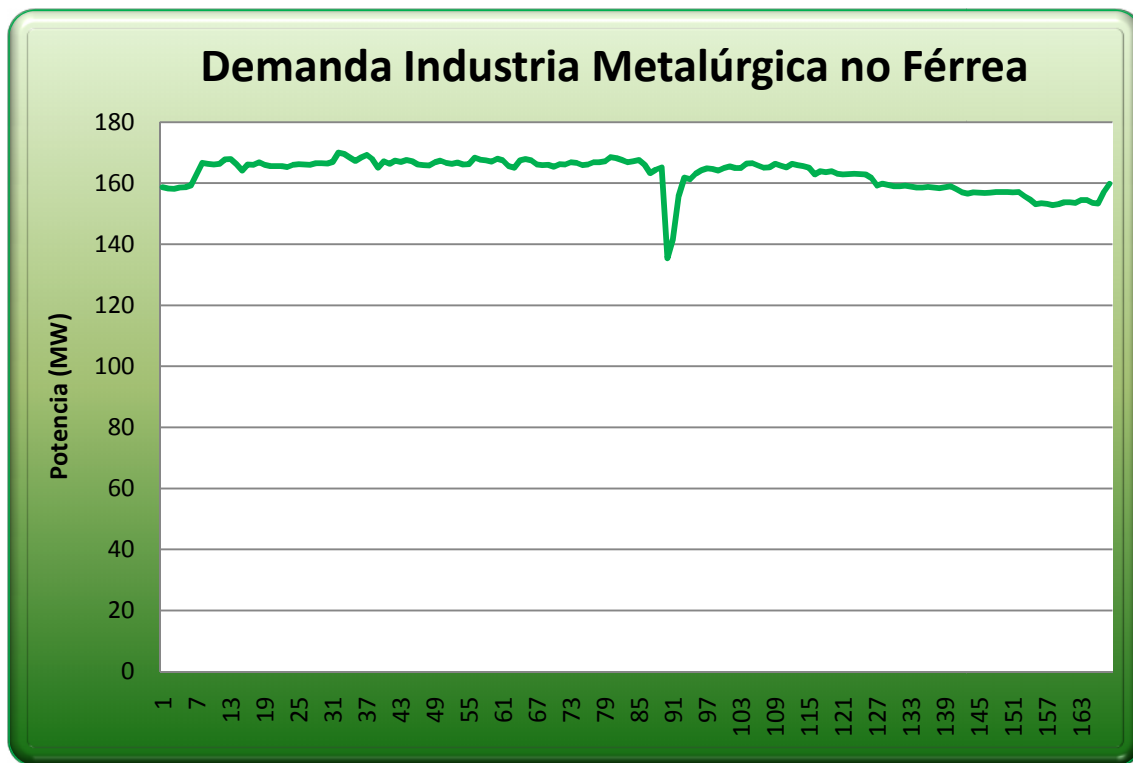


Figura 48: Consumo eléctrico semanal del sector de metalurgia no férrea

Se ha obtenido la demanda eléctrica de 1 planta de metalurgia no integral de 50 MW y 2 plantas de 60 MW.

De la gráfica de demanda semanal se observa que el consumo máximo está en torno a 170 MW. Se trata de una demanda constante, con algún descenso puntual hasta 140 MW, que se puede deber a operaciones de mantenimiento de módulos de la planta.

En cuanto al consumo de energético, la energía consumida el miércoles es de 4001,8 MWh, el consumo en sábado es de 3829,8 MWh, el consumo de una semana es de 27382,7MWh, y el consumo anual es de 1423,9 GWh.

c) Demanda del caso simulado en el sector de extracción de gases

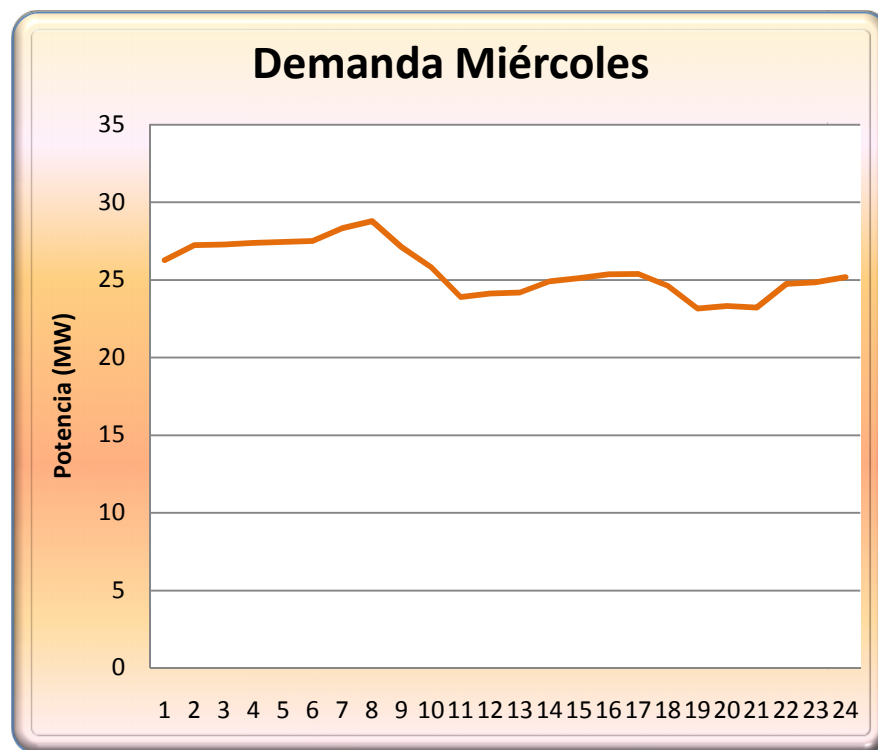


Figura 49: Consumo eléctrico en miércoles en el sector de extracción de gases

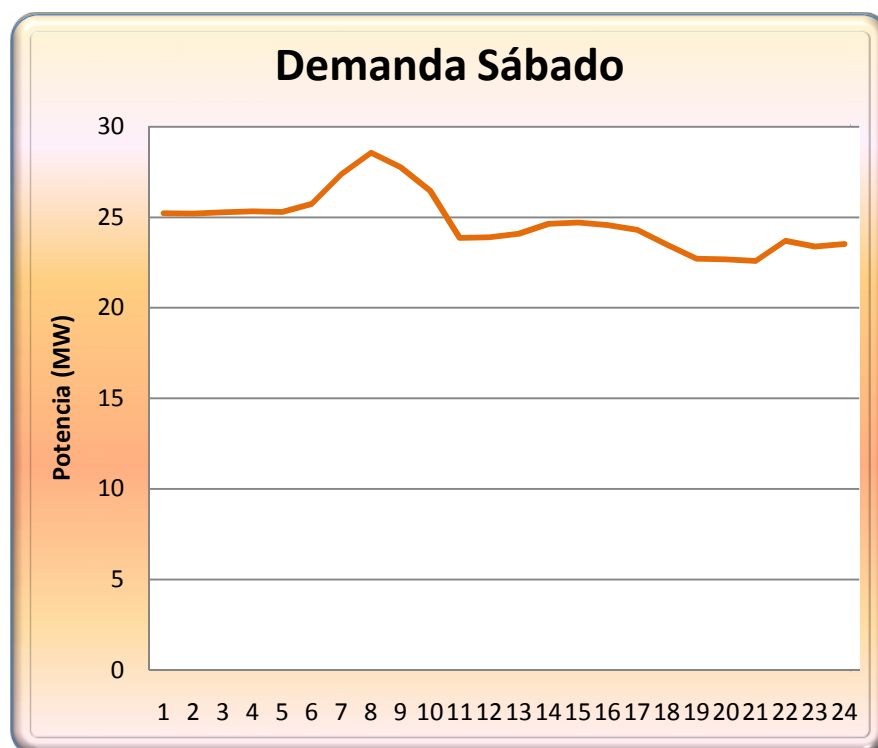


Figura 50: Consumo eléctrico en sábado en el sector de la extracción de gases

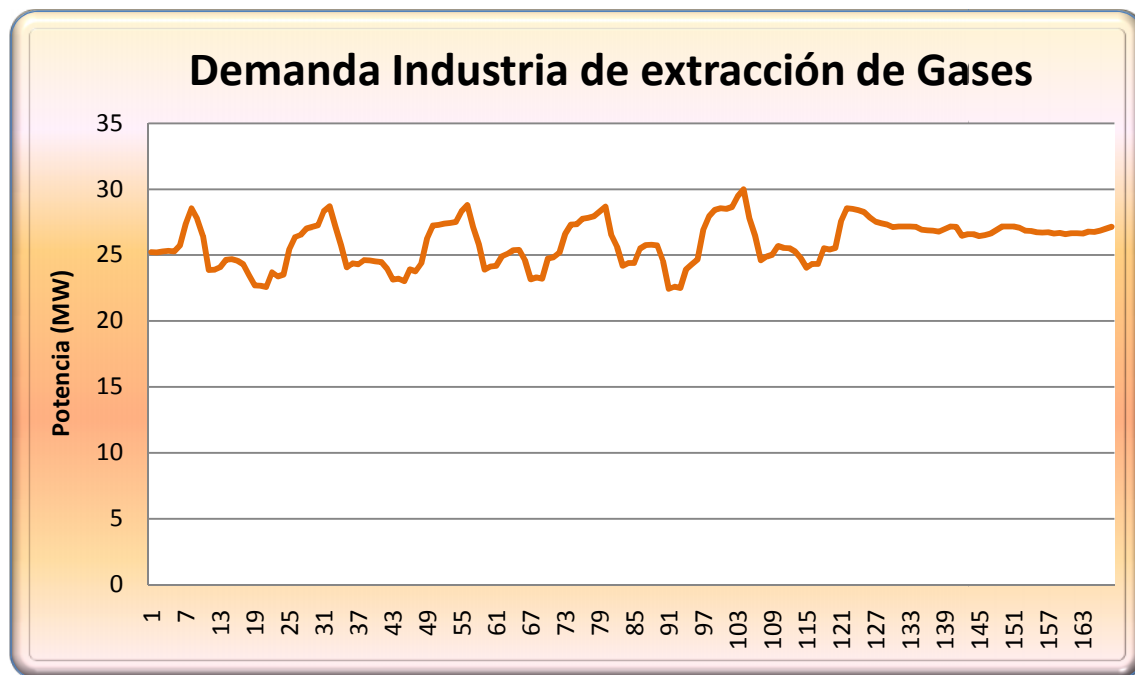


Figura 51: Consumo eléctrico semanal en el sector de la extracción de gases

Se ha obtenido la demanda eléctrica de 3 plantas de 10 MW de extracción de gases por fraccionamiento del aire.

De la gráfica de demanda semanal se observa que el consumo máximo se da en torno a 30 MW. Se trata de una demanda modular, en la que se alcanza el consumo máximo (30 MW) en las madrugadas y el consumo mínimo (22 MW) en las horas del día. Este comportamiento se debe a la diferencia de precios de la electricidad en horas valle y horas pico. En fines de semana se observa un consumo constante de electricidad de 27 MW aproximadamente.

En cuanto al consumo de energético, la energía consumida el miércoles es de 615,3 MWh, el consumo en sábado es de 655,6MWh, el consumo de una semana es de 4362,9 MWh, y el consumo anual es de 226,9 GWh.

d) Demanda del caso simulado agregada de los 3 sectores industriales

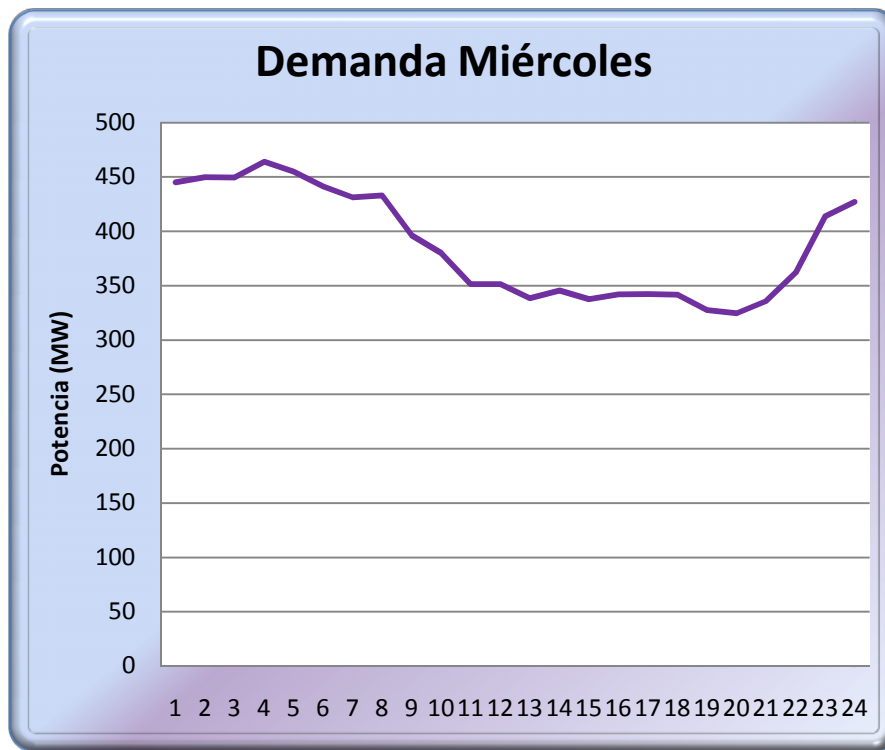


Figura 52: Demanda agregada en miércoles

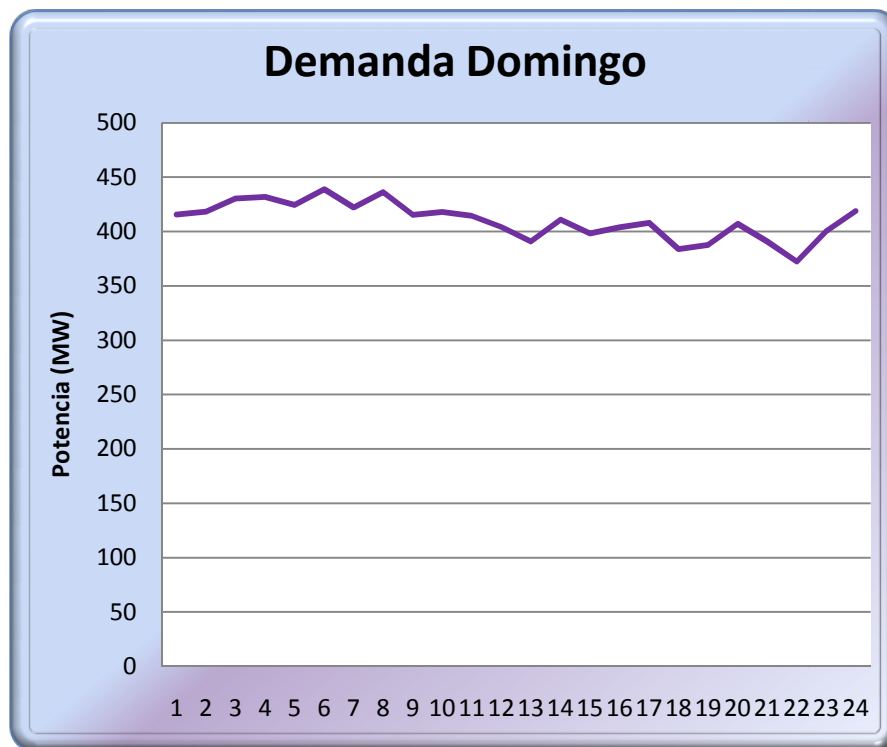


Figura 53: Demanda agregada en Domingo

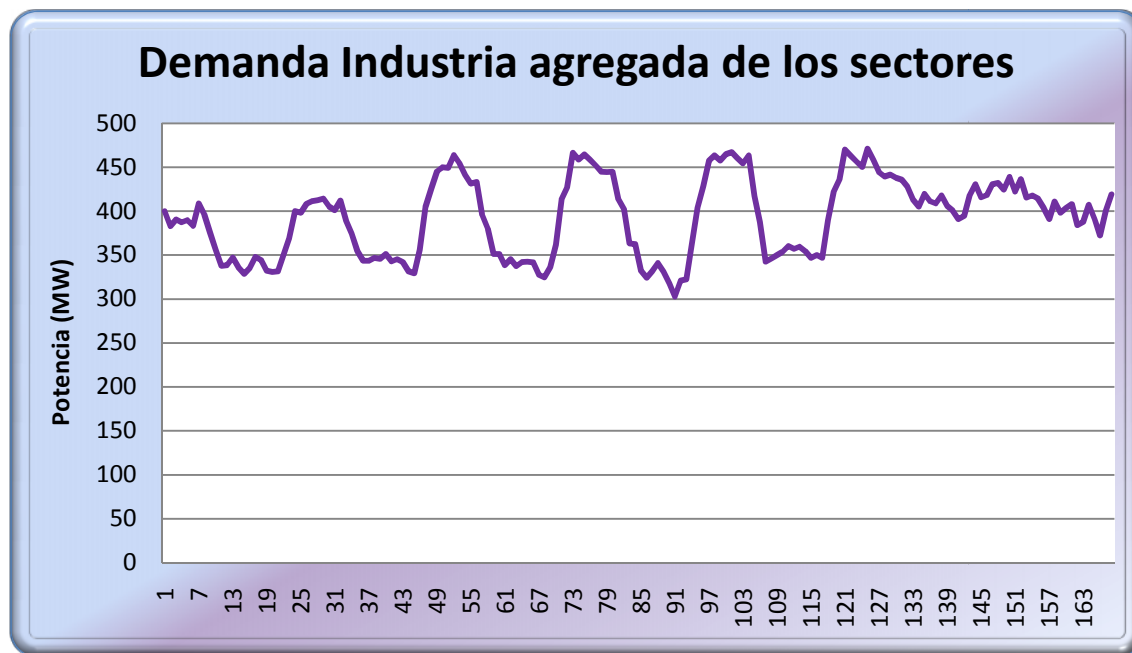


Figura 54: Demanda semanal agregada de los 3 sectores

Se ha obtenido la demanda eléctrica de todas las plantas en conjunto de la simulación.

A primera vista se observa una demanda modular. Hay que tener en cuenta que la industria de siderurgia no integral es la que más potencia consume de los 3 sectores con diferencia, por lo que no es de extrañar que la demanda agregada sea muy parecida en cuanto a su forma a la de esta industria. Los picos de consumo, en torno a 480 MW, se alcanzan en las madrugadas, durante las horas valle de la demanda eléctrica nacional, cuando la electricidad tiene un precio mínimo. Los valles, en torno a 300 MW se alcanzan por el contrario en las horas pico de la demanda eléctrica nacional. Los fines de semana se observa un consumo constante de 400 MW aproximadamente.

En cuanto al consumo de energético, la energía consumida el miércoles es de 9286,28 MWh, el consumo en domingo es de 9843,4 MWh, el consumo de una semana es de 66041,3 MWh, y el consumo anual es de 3434,1 GWh. Si se compara este resultado con la Energía eléctrica consumida por la industria en 2007 según el MMA (Tabla 4), el consumo de Electricidad de esta simulación es aproximadamente un 3% del consumo eléctrico en la industria.

La demanda eléctrica nacional presenta en sus horas valle una potencia de unos 22000 MW y en horas pico, cerca de 40000 MW. La demanda eléctrica en la simulación estudiada conforma una parte de la nacional (entre 300 y 500 MW) y además contribuye a aplanarla, ya que el mayor consumo es en las horas valle y el menor en las puntas.



Capítulo 6

Conclusiones

Como conclusión del presente PFC, es importante recalcar que se han alcanzado los 2 objetivos principales propuestos: El conocimiento de los sectores industriales de siderurgia, metalurgia del zinc y gases industriales en cuanto a su consumo de electricidad y el desarrollo de la herramienta de simulación de este consumo.

Se ha estudiado el funcionamiento del sistema eléctrico español y la demanda de energía eléctrica de España, aportando datos y estadísticas sobre sus principales características. Los procesos industriales en los sectores de siderurgia, metalurgia del zinc y extracción de gases industriales por fraccionamiento del aire han sido minuciosamente definidos y analizados, señalando los procesos que demandan mucha energía y puntualizando sobre los que consumen energía eléctrica.

Se han definido patrones de consumo de electricidad para los 3 sectores industriales y se ha desarrollado una aplicación informática capaz de simular la demanda y consumo energético de los sectores en base a estos patrones.

Para finalizar se han realizado simulaciones con la aplicación informática y presentado en la memoria un caso de estudio con varias industrias.

Como experiencia personal, me gustaría destacar que el desarrollo de este PFC ha servido para complementar mi formación de Ingeniero Industrial. He aplicado conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Industrial y conocimientos adquiridos al enfrentar los distintos problemas que han ido surgiendo para el PFC, como búsqueda y comprensión de información, desarrollo de la memoria de proyecto o el desarrollo de la herramienta informática de simulación.



Bibliografía

- [1] Red Eléctrica de España. Noviembre 2010 <http://www.ree.es>
- [2] Ministerio de medio ambiente, consumo industrial de energía. Noviembre 2010 http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/banco_publico_ia/
- [3] UNESID. Noviembre 2010 <http://www.unesid.org>
- [4] J. Antonio Fidalgo Sánchez, Manuel R. Fernández Pérez, Noemí Fernández Fernández, Emilio R. Gutiérrez Álvarez, *Tecnología Industrial*, Everest, 1999.
- [5] Proceso productivo siderúrgico. Noviembre 2010 <http://www.infoacero.cl>
- [6] La industria siderúrgica. Noviembre 2010 http://www.aim.es/publicaciones/bol2/06_Siderurgia.pdf
- [7] Proceso de fabricación. Noviembre 2010 <http://www.celsa.com/Productos.mvc/Procesofabricacion>
- [8] Proceso siderúrgico. Noviembre 2010 <http://www.huachipato.cl/proceso/proceso.htm>
- [9] Hornos de coque. Noviembre 2010 <http://www.oviedocorreio.es/personales/carbon/coque/coque%20metalurgico.htm>
- [10] Esquema alto horno. Noviembre 2010 <http://www.fisicanet.com.ar/quimica/procesos/ap1/metalurgia01.gif>
- [11] Esquema de un horno de arco eléctrico. Noviembre 2010 <http://tecnometalesferrosos.blogspot.com/2009/02/procesos-de-obtencion-del-acero.html>
- [12] Sydney H. Avner, *Introducción a la metalurgia física*, McGraw-Hill, 1990.
- [13] Acerca del cinc. Noviembre 2010 <http://www.latiza.com/acercadelzinc.html>
- [14] Zinc y Plomo. Noviembre 2010 <http://www.slideshare.net/guest3ae10c/trabajo-zinc-y-plomo>
- [15] Española de Zinc. Noviembre 2010 <http://www.edz.es/principal.htm>
- [16] El zinc y su metalurgia. Noviembre 2010 http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UM/AVAILABLE/TDR-1020106-133045/Tasm04de16.pdf
- [17] Refinería de zinc de Ar Zinc S.A. Noviembre 2010 <http://www.aguilar-arzinc.com/procesos2.php>



- [18] International Zinc Associaton. Noviembre 2010 www.iza.com
- [19] Producción de Messer. Noviembre 2010
http://www.messer.es/Productos_y_suministros/Plantas_On-Site/Plantas_on_site.pdf
- [20] Fraccionamiento del aire. Noviembre 2010
http://www.messer.es/Productos_y_Soluciones/Fraccionamiento_del_aire/Folleto.pdf
- [21] Oxígeno. Noviembre 2010 http://www.messer.es/Know-how_de_gases/variedad_gases/Oxigeno/index.html
- [22] Nitrógeno. Noviembre 2010 http://www.messer.es/Know-how_de_gases/variedad_gases/Nitrogeno/index.html
- [23] Argón. Noviembre 2010 http://www.messer.es/Know-how_de_gases/variedad_gases/Argon/index.html
- [24] Carburos Metálicos. Noviembre 2010 <http://www.carburos.com>
- [25] BMW. Noviembre 2010
<http://www.bmw.es/es/es/newvehicles/z4/z4/2009/allfacts/ergonomics/lights.html>
- [26] Apuntes de Regulación de Sistemas eléctricos, 5º Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid.
- [27] Apuntes de Sistemas eléctricos, 4º Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid.
- [28] Ministerio de industria, turismo y comercio. Noviembre 2010 <http://www.mityc.es>
- [29] Instituto nacional de estadística. Noviembre 2010 <http://www.ine.es>
- [30] AEGE Noviembre 2010
http://www.aege.biz/conf/Economia_sostenible_y_eficiencia_energetica.pdf